

La presencia humana más allá del sistema solar

Primeros pasos
hacia el éxodo interestelar



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

La presencia humana más allá del sistema solar

Primeros pasos
hacia el éxodo interestelar

RBA

Imagen de cubierta: Impresión artística de una nave espacial tripulada, llegando a su destino en un sistema binario.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Óscar Augusto Rodríguez Baquero por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: AGE: 23, 133, 118; Bill Saxton (NRAO/AUI/NSF)/NAO: 57; Bill Stafford, James Blair, Regan Geeseman/NASA: 117; Bill Stafford/NASA: 77; Daein Ballard/Wikimedia Commons: 110; Donald Davis-NASA Ames Research Center/Wikimedia Commons: 17a; ESA, NASA, and L. Calcada (ESO for STScI)/ESA, NASA: 107bi; ESA: 97Galaxy Publishing/Ed Emshwiller/Wikimedia Commons: 119; John Frassanito and Associates/NASA: 107ai; Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/NASA: 59bd; JPL-Caltech/NASA: 67, 93, 106; L. Weinstein/Ciel et Espace Photos/ESO: 33a; M. Kornmesser/ESO: 95b; M. Kornmesser/Nick Risinger/ESO: 33b; Marshall Space Flight Center/Wikimedia Commons/NASA: 73b; Michael Okoniewski 1994/Wikimedia Commons: 129; Miksu-Own work/Wikimedia Commons: 149a; N. Bartmann/spaceengine.org/ESO: 43b; NASA and Ball Aerospace/NASA: 37; NASA: 17bi; 87i; NASA's Goddard Space Flight Center/NASA: 61bi; NASA's Goddard Space Flight Center/Chris Gunn de Greenbelt, MD, USA/NASA: 87d; NASA/MSFC: 107ad; NBC Television/Wikimedia Commons: 17bd; NordGen/Dag Terje Filip Endresen/Wikimedia Commons: 149b; Óscar Augusto Rodríguez Baquero con imágenes de ESO/M. Kornmesser, NASA, NASA Ames/SETI Institute/JPL-Caltech: portada; Óscar Augusto Rodríguez Baquero/ESO/NASA: 61a; P. Kalas (Univ. of California, Berkeley) *et al.*/ESA, NASA: 43a; Q. Zhang, University of California/NASA: 73a; SAIC/NASA: 107bd; Schokraie E, Warnken U, Hotz-Wagenblatt A, Grohne MA, Hengherr S, *et al.*/Wikimedia Commons: 127; Y. Beletsky (LCO)/ESO: 95a.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9090-8

Depósito legal: B-22061-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	El sueño del viaje interestelar 13
CAPÍTULO 2	Planetas extrasolares 27
CAPÍTULO 3	Más allá de la heliosfera 47
CAPÍTULO 4	¿Cómo llegar a las estrellas? 63
CAPÍTULO 5	La elección de un destino 81
CAPÍTULO 6	El factor humano 99
CAPÍTULO 7	Un posible encuentro extraterrestre 121
CAPÍTULO 8	El futuro de nuestra especie 135
LECTURAS RECOMENDADAS	153
ÍNDICE	155

INTRODUCCIÓN

El ser humano siempre se ha sentido motivado por varios instintos, siendo el principal de ellos el de la conservación de su propia vida, es decir, el instinto de supervivencia, que nos ha llevado a multiplicarnos y expandirnos, garantizando así la continuidad de nuestra especie sobre la faz de la Tierra a lo largo de miles de años.

Uno de los factores que han influido notablemente en la supervivencia humana ha sido la curiosidad, la búsqueda de respuestas, desde las más prosaicas hasta las más trascendentales. La curiosidad es avidez de conocimiento, y este último constituye una de las bases sobre las que se asienta la supervivencia. Cuestiones tan simples como «¿qué habrá tras aquella colina?» encontraron solución en el momento en que emprendimos el camino para intentar hallar la respuesta, naciendo así una actividad que ha acompañado a nuestra especie desde el amanecer de los tiempos: la exploración. Con ella, descubrimos nuevas tierras, nuevos lugares en los que asentarnos y de los que obtuvimos recursos que garantizaron nuestra pervivencia y la proliferación del ser humano a lo largo y ancho del globo terrestre con el transcurso del tiempo.

Nuestro deseo por conocer más sobre el entorno que nos rodea nos llevó a preguntarnos si era posible abandonar nuestro planeta para adentrarnos en el frío y oscuro vacío del espacio. La respuesta llegó en el cuarto día del mes de octubre del año 1957, fecha en la que una pequeña esfera de aluminio, dotada de cuatro largas antenas, partía desde las áridas estepas de la República de Kazajistán, dejando atrás nuestra atmósfera pocos minutos después del despegue para entrar en la órbita de la Tierra. Nació así lo que popularmente conocemos como era espacial, una nueva etapa de exploración que dura ya seis décadas, a lo largo de la cual hemos adquirido un nivel de conocimiento sobre nuestro entorno planetario, y sobre el universo en general, sin precedentes en la historia de la civilización.

Gracias a la astronáutica sabemos que es posible enviar humanos al espacio, hacerlos aterrizar en otros cuerpos celestes y traerlos de vuelta a la Tierra con éxito. Mediante robots, hemos recorrido las planicies del vecino Marte, y el lanzamiento de telescopios orbitales nos ha permitido obtener una visión completamente nueva del universo, pudiendo retrotraernos en el tiempo hasta los primeros segundos después del Big Bang, aquella gran explosión origen de todo lo que conocemos.

Estas seis décadas de exploración espacial también nos han permitido profundizar en el conocimiento de la dinámica de las estrellas. Sabemos cómo nacen, cómo evolucionan, y también cómo mueren, procesos que afectan, sin excepción, a todas y cada una de las estrellas que pueblan el universo conocido, incluido nuestro Sol, una estrella de tipo medio con una longevidad que los científicos estiman en torno a los diez mil millones de años, y que ya ha cumplido la mitad de su vida prevista.

Aunque con frecuencia no nos percatamos de ello, nuestra supervivencia depende del Sol, dado que este constituye la principal fuente de energía que todo ser vivo precisa para existir. Un ejemplo de ello lo encontramos en las plantas, que necesitan la luz del Sol para sintetizar los carbohidratos, un proceso conocido como fotosíntesis. Nosotros, los humanos, dependemos igualmente del Sol para fabricar un nutriente esencial, la vita-

mina D, que, entre otras cosas, regula los niveles de calcio de nuestra sangre y huesos.

Los estudios realizados en el marco de la heliofísica apuntan a que, antes de morir, nuestra estrella experimentará una transformación que hará inviable la vida en la Tierra. Previamente a su colapso definitivo, el Sol sufrirá un aumento de tamaño que probablemente le hará crecer hasta alcanzar las órbitas de los planetas interiores del sistema solar, incluido el nuestro, que podría ser engullido literalmente por el astro rey. Inexorablemente, el destino de la Tierra se encuentra unido al del Sol, y si la especie humana logra sobrevivir hasta el final de los días de nuestro planeta, deberá encontrar, con el tiempo suficiente, otro hogar celeste para evitar así la extinción. Y ese lugar, casi con toda seguridad, se encuentra en otro sistema solar, a años-luz de distancia. Ello obligará a nuestra civilización a afrontar un desafío científico, tecnológico y económico sin precedentes en la historia de la humanidad, en el marco de un proyecto que se extenderá a lo largo de muchos siglos, involucrando por tanto a centenares de generaciones.

Uno de los principales problemas que deberá resolver la humanidad para emprender el viaje hacia otras estrellas es el de la velocidad. Las naves Voyager 1 y 2 de la NASA, dos de los vehículos más rápidos construidos por el ser humano, viajan a una velocidad relativa al Sol próxima a los 62 000 km/h. Abandonaron nuestro planeta en el año 1977 e invirtieron cuarenta años en cubrir una distancia de algo más de 134 y 110 UA (unidades astronómicas), respectivamente. La primera cifra equivale a más de veinte mil millones de kilómetros, una distancia que nos puede parecer muy grande en el ámbito cotidiano pero que, en términos astronómicos, es extremadamente pequeña. Manteniendo esa velocidad, una nave espacial invertiría alrededor de 76 000 años en llegar a Alfa Centauri, el sistema estelar más cercano al nuestro. Este se encuentra situado a 4,3 años-luz, es decir, a más de cuarenta billones de kilómetros, y en torno a una de sus estrellas, Próxima Centauri, los científicos han descubierto un planeta de tamaño similar a la Tierra, denominado Próxima Centauri b, que orbita en una región considerada habitable, en la

que las temperaturas permiten la existencia de agua en forma líquida. Tales plazos de tiempo son absolutamente inviables para una misión espacial convencional, pero existen proyectos para el envío de naves espaciales a velocidades relativistas que, si bien no serán tan rápidas como la luz, sí ganarán la velocidad suficiente como para reducir esos 76000 años a un plazo de cuatro décadas, algo mucho más factible para una expedición humana.

Por otra parte, carecemos de información detallada sobre las condiciones que reinan en el medio interestelar. Nuestro sistema solar se encuentra «protegido» de la radiación cósmica emitida por los diferentes cuerpos celestes que pueblan el firmamento, gracias a una envoltura denominada heliosfera, generada por la actividad de nuestro Sol. Es por ello por lo que se hace imprescindible la puesta en marcha de misiones robotizadas más allá de esa envoltura solar, al objeto de recopilar datos que puedan utilizarse más adelante y que se antojan de vital importancia para poder dar el salto a las estrellas con unos ciertos niveles de seguridad.

Paralelamente a las investigaciones que se lleven a cabo más allá de la heliosfera, será igualmente esencial adquirir experiencia en otros ámbitos, como el establecimiento de asentamientos planetarios. Por ahora, las visitas a la Luna han sido muy breves, y meramente exploratorias. La migración humana a planetas extrasolares pasará por la realización, con éxito, de ensayos previos, usando como campo de pruebas planetas vecinos como Marte. Los próximos cincuenta años serán cruciales para comprobar si el ser humano tiene la capacidad de lograr tal objetivo y establecer una presencia permanente en la superficie marciana. Otro de los ámbitos que debe ser explorado es la capacidad de transformar la atmósfera de los planetas con el propósito de permitir que las formas de vida que conocemos, incluida la especie humana, puedan sobrevivir en su superficie prescindiendo de estructuras presurizadas y sistemas de soporte vital. Esa capacidad abre las puertas a una nueva área tecnológica, la ingeniería planetaria. La construcción y establecimiento de procesadores atmosféricos que doten a los planetas de presión y aire respirable es, nunca mejor dicho, vital, dado que será muy difícil encon-

trar planetas candidatos a la colonización cuyas características atmosféricas sean exactas a las de la Tierra. Una mínima variación en ellas podría impedir el asentamiento humano en tales mundos si antes no se han desarrollado técnicas que permitan la adecuación de la atmósfera.

Todos estos pasos previos, incluyendo la construcción de los vehículos destinados a la migración humana a otros sistemas solares, constituyen, como mencionábamos antes, una empresa que involucrará a centenares de generaciones. El ser humano suele razonar de manera individualista y cortoplacista. Somos tendentes, de manera sistemática, a preferir asegurarnos lo necesario para nuestra supervivencia en el presente, independientemente de si las generaciones venideras se verán perjudicadas por nuestras acciones. ¿Seremos capaces de invertir tiempo y recursos en estos proyectos de ejecución tan larga? ¿Podremos llegar a pensar como especie en lugar de como individuos? Estas son preguntas para las que todavía no existen respuestas definitivas, y de ellas depende el éxito de todas y cada una de estas iniciativas. Solo el pensamiento colectivo podrá abrirnos las puertas a las estrellas, convirtiéndonos así en una especie de carácter interestelar y asegurando con ello nuestra pervivencia y expansión. Ya lo adelantaba uno de los padres de la astronáutica, el ruso Konstantín Tsiolkovski, al asegurar a finales del siglo XIX que la Tierra era la cuna de la humanidad, y que no podremos permanecer en la cuna para siempre.

CAPÍTULO 1

El sueño del viaje interestelar

Viajar hacia otras estrellas, al igual que todas las empresas de carácter científico, tiene su origen en la imaginación humana, plasmada en lo que conocemos como ciencia ficción. Diversas novelas y largometrajes han descrito, con más o menos acierto, cómo se desarrollarán en el futuro las expediciones humanas a planetas extrasolares.

En la amplia y eterna oscuridad del espacio, la astronave comercial Nostromo viaja de retorno a la Tierra. La tripulación, sometida a un estado de hibernación, es despertada de su letargo por MADRE, la computadora central de la nave, al interceptar una extraña transmisión de radio cuyo origen se sitúa en una pequeña luna que orbita en torno a un planeta gaseoso ubicado en la constelación de Reticulum. Así comienza *Alien*, una película de terror dirigida por Ridley Scott en el año 1979 y ambientada en el siglo **xxii**, un marco temporal en el que los vuelos más allá del sistema solar son algo cotidiano.

A lo largo de los años ha quedado demostrada la interacción entre la ciencia y la ficción. Conceptos que hoy son abordados en ámbitos científicos y tecnológicos tuvieron su origen en la imaginación humana. Del mismo modo, un importante número de historias ficticias, sobre todo las más recientes, están asentadas en hechos factibles que, si bien no pueden materializarse todavía, es muy probable que vean la luz en un futuro no excesivamente lejano. La ciencia ficción, con frecuencia, es el punto de partida hacia la consecución de una meta a largo plazo. Y no hay mejor forma de predecir el futuro que inventarlo.

La idea de emprender viajes humanos interestelares, aunque nacida en el seno de la ciencia ficción hace un siglo, fue inspirada por algunos científicos e ingenieros, considerados hoy padres de la astronáutica, quienes, a través de historias y novelas, combinaron sus anhelos y curiosidades sobre el espacio con sus conocimientos de la materia.

Probablemente, el relato más antiguo que se conoce en el que se hace referencia a viajes interestelares en el marco de la ciencia ficción es *La última migración*,

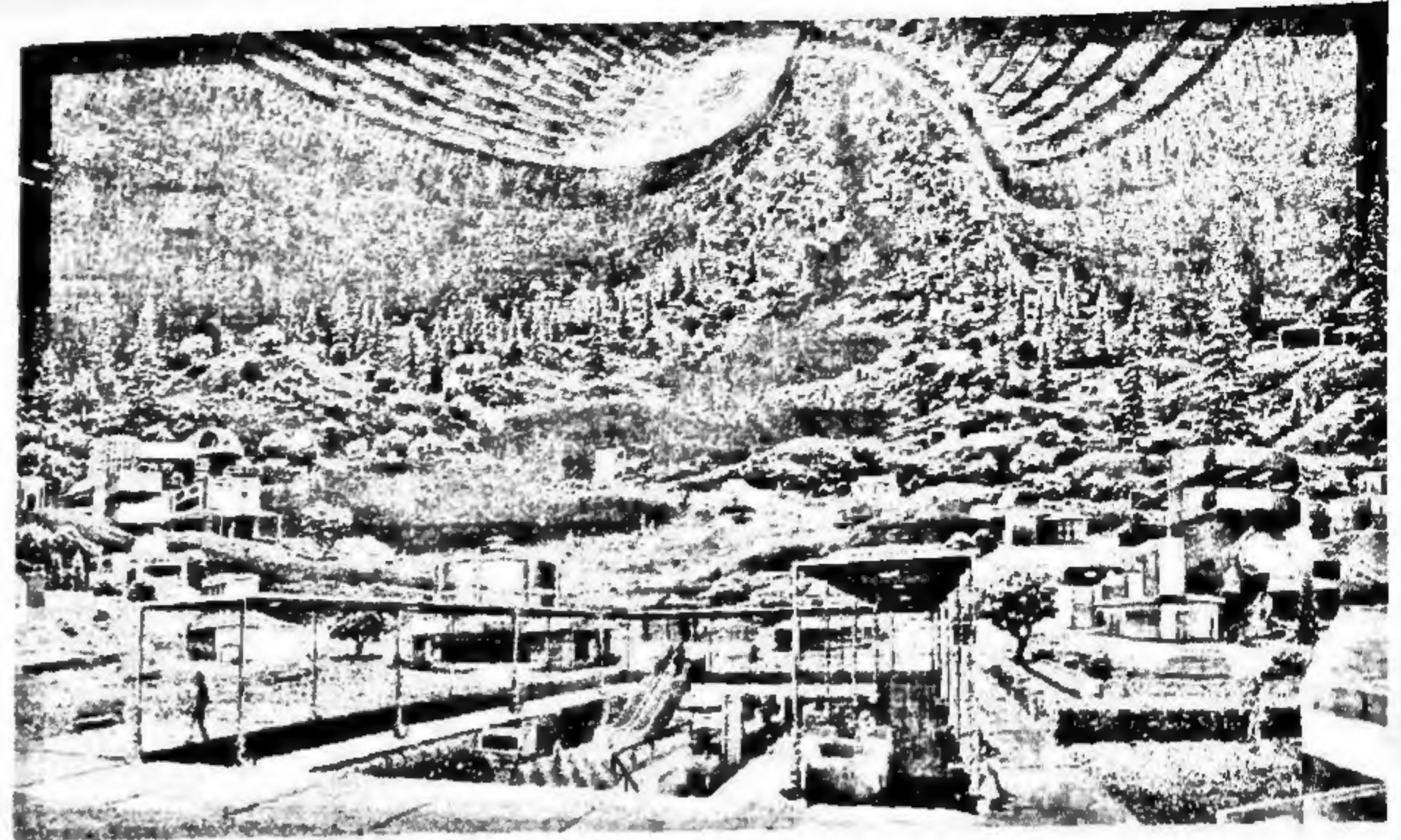
Es difícil decir qué es imposible.
Los sueños del ayer son la
esperanza del hoy y la realidad del
mañana.

ROBERT HUTCHINGS GODDARD

la historia escrita en 1918 por el inventor del cohete de combustible líquido, el ingeniero estadounidense Robert Hutchings Goddard (en la fotografía inferior izquierda de la página contigua). Esta historia, que no trascendió públicamente hasta el año 1972, sumerge al lector en una época futura en la que la humanidad, con el propósito de migrar a otros sistemas solares, ha sido capaz de fletar gigantescas naves espaciales, una suerte de «arcas de Noé» que portan, de manera condensada, todo el conocimiento y tecnología de la especie humana, propulsadas mediante una tecnología de fusión nuclear del hidrógeno. El mismo día que escribió aquella historia, Goddard redactó una versión condensada, en la que especulaba con la utilización de pequeñas lunas o asteroides como vehículos para realizar un viaje interestelar, empleando como sistema de propulsión un concepto que denominó energía intraatómica.

Las historias de Goddard supusieron la introducción de las denominadas naves generacionales (véase una recreación artística en la página contigua), vehículos espaciales cuyos tripulantes desarrollan una vida normal, que les permite tener descendencia y, así, producir generaciones enteras que suceden a las anteriores. Goddard incluso especuló sobre los cambios que podrían sufrir las sucesivas generaciones en diversos ámbitos, entre ellos el psicológico y el genético. En misiones excesivamente largas, con una duración de varios centenares de miles de años, Goddard pensaba que la mejor opción era someter a los miembros

cia ficción es *La última migración*, la historia escrita en 1918 por el inventor del cohete de combustible líquido, el ingeniero estadounidense Robert Hutchings Goddard (en la fotografía inferior izquierda de la página contigua). Esta historia, que no trascendió públicamente hasta el año



Arriba, impresión artística de un «mundo isla», un concepto de nave generacional propuesto por el ingeniero británico Gerard O'Neill. Abajo, a la izquierda, Robert H. Goddard, que abordó la migración humana a otros sistemas solares en el ámbito de la ciencia ficción. A la derecha, los actores Leonard Nimoy (izquierda) y William Shatner (derecha) en una imagen promocional de la popular serie *Star Trek*.

de las tripulaciones a lo que hoy conocemos como hibernación o animación suspendida, despertándolos a ciertos intervalos de tiempo al objeto de realizar, si fuera necesario, las correspondientes correcciones de rumbo de la nave espacial.

El físico ruso Konstantín Tsiolkovski, otro de los padres de la astronáutica, también realizó incursiones en el mundo de la ciencia ficción espacial. En 1928 escribió una historia titulada *El futuro de la Tierra y de la humanidad*. Al igual que God-

dard, Tsiolkovski introdujo la nave generacional en su relato. Tras varios siglos de viaje, los descendientes de los primigenios tripulantes habían cambiado tanto en aspectos tan diversos, que no consideraban a la Tierra como su planeta de origen.

El concepto de nave generacional presenta multitud de problemas a la hora de materializarse, siendo el principal de ellos el relativo a los recursos en materia de soporte vital: aire respirable, agua y alimentos,

entre otros muchos. Goddard parecía encontrarse en el camino correcto cuando abordó la animación suspendida como técnica para realizar viajes de tan larga duración.

En las últimas décadas, los autores tienden a recurrir al asesoramiento de científicos e ingenieros para dotar de verosimilitud a sus historias. Lo cierto es que, desde el punto de vista comercial, no hay nada tan atrayente como una historia cuyo argumento, además de resultar interesante, pueda, de algún modo, convertirse en realidad en un plazo de tiempo no demasiado largo.

Algunos de los sistemas de propulsión descritos en la saga *Alien*, que permiten realizar expediciones tan distantes, se basan en motores iónicos de plasma alimentados por energía nuclear, un concepto que, junto a la propulsión nuclear de pulsos, ya se había esbozado previamente en las mesas de diseño. Los motores iónicos ya han sido introducidos en diversas misiones espaciales no tripuladas, entre ellas la estadounidense Deep Space 1,

la japonesa Hayabusa 1 y la europea SMART-1, siendo su principal cualidad la de proporcionar un empuje continuo a los vehículos espaciales. En tales misiones, la introducción de este tipo de sistemas de propulsión estaba orientada, principalmente, a estudiar su versatilidad. En destinos cercanos esta tecnología suele ser más un inconveniente que una ventaja, ya que los motores de este tipo tardan mucho en rendir la máxima potencia. En misiones a cuerpos cercanos, las naves espaciales llegarían antes de que sus motores iónicos alcanzasen la potencia máxima. Por ello son más apropiados para destinos remotos.

Otra obra de ficción cuyo argumento se centra en viajes humanos de carácter interestelar, y que cuenta con una base científica bastante sólida, vio la luz en el año 1995 con el título original de *Cualquier tecnología suficientemente avanzada es indistinguible de la magia*. Su autor, el físico y escritor Robert Forward, describe en ella una tecnología de propulsión que permite a las naves espaciales alcanzar hasta un diez por ciento de la velocidad de la luz (es decir, aproximadamente 30 000 km/s). Se trata de vehículos muy ligeros, cuyo sistema de propulsión está basa-

Conceptos surgidos en la ciencia ficción y materializados por la tecnología	
Año	Concepto
1865	Cohetes lanzadores de alta velocidad.
1869	Retrocohetes.
1920	Empleo de velas como sistema de propulsión.
1928	Módulos de aterrizaje planetario.
1929	Aletas estabilizadoras para la estabilidad aerodinámica de los cohetes. Edificios de ensamblaje vertical. Clusters (conjuntos) de cohetes aceleradores. Actividades extravehiculares, trajes espaciales, umbilicales de soporte vital.
1945	Construcción de estaciones orbitales mediante el transporte de estructuras y mantenimiento regular de las mismas en el espacio. Comunicación vía satélite mediante ingenios en órbita geoestacionaria.
1954	Tanques de almacenamiento de propergol múltiple. Módulos aerodinámicos tripulados de entrada atmosférica.

Todos habéis sacrificado mucho para estar aquí y formar parte de lo que estamos haciendo [...]. Es la primera misión colonizadora a gran escala de la historia, y en la Tierra todo el mundo agradece muchísimo vuestro enorme esfuerzo, vuestro valor.

DANIELS, PERSONAJE DE *ALIEN: COVENANT*

do en los denominados *ramjet* o estatorreactores, dispositivos que generan un intenso campo magnético mediante el cual son capaces de recoger el hidrógeno interestelar durante el vuelo, empleándolo como combustible. La nave experimenta una paulatina aceleración a medida que obtiene hidrógeno, lo que permite al estatorreactor recoger mayores cantidades de este elemento y, con ellas, alcanzar mayor velocidad. Este concepto había sido propuesto por el físico Robert W. Bussard treinta y cinco años antes de la publicación de dicha novela.

HISTORIAS DE UN SUEÑO PROFUNDO

Una misión tripulada de carácter interestelar, sea cual fuere el método de propulsión empleado, invertirá un periodo de tiempo notablemente superior al de la longevidad humana. Conocidos los numerosos inconvenientes que presenta el concepto de nave generacional, especialmente en lo que a recursos se refiere, quizá la solución a este problema consista en someter a los tripulantes a un estado de hibernación, algo que, como explicábamos en líneas anteriores, ya había considerado Robert H. Goddard en una de sus historias de ficción. Este concepto, que cuenta con varias denominaciones (letargo, criostasis, hipersueño, animación suspendida...) es, contrariamente a lo que podríamos pensar, bastante antiguo, constituyendo el argumento central de algunas historias muy populares que, aunque no se desarrollan en escenarios del ámbito espacial, constituyen de alguna forma el germen del concepto de animación suspendida.

Quizá el relato más antiguo relacionado con el sueño profundo o hibernación sea la leyenda de Holger Danske (Ogier el danés), un personaje protagonista de *El Cantar de Roland* (ca. 1060), que según algunos testimonios escritos, puede tener su origen en un hombre llamado Olgerus Danicae Dux (Olgero, duque de Danica) quien, con la ayuda de Carlomagno, reconstruyó el monasterio de San Martín de Colonia después de que este fuera saqueado por los sajones en el año 778. Según las leyendas danesas, Ogier, que llegó a ser rey, se encontraba sometido a un

sueño profundo del que despertaría en el caso de que Dinamarca se encontrase amenazada por algún peligro.

Otro relato que podríamos relacionar con la animación suspendida, este de popularidad universal, fue escrito en 1812 por los hermanos Grimm, y publicada su revisión cuarenta y dos años después. Titulado en alemán antiguo *Sneewittchen*, «Blancanieves», explora las envidias de una reina por la belleza de la joven protagonista. Su enfermiza obsesión por ella la conduce a intentar asesinarla en varias ocasiones. En la última de ellas, regala a la joven una manzana envenenada, cuya ingestión le hace caer en un estado de sueño profundo. Introducida en un cofre de cristal —que, de algún modo, guarda semejanza con las unidades de animación suspendida de algunas historias y películas recientes de ficción espacial—, la joven recupera la consciencia tras ser besada por un príncipe que había quedado profundamente enamorado de ella a primera vista.

La literatura del siglo xx ha abordado en numerosas ocasiones la hibernación humana desde la perspectiva de las misiones interestelares. Arthur C. Clarke, autor de renombradas obras como *2001: una odisea del espacio* (1968), que trata la animación suspendida en vuelos espaciales que tenían lugar dentro de nuestro sistema solar, publicó en el año 1986 la novela *Cánticos de la lejana Tierra*, basada en un relato corto con el mismo título que él mismo escribió en 1958. La historia se sitúa en el año 3800, y está ambientada en el ficticio planeta oceánico Thalassa. En él reside una pequeña comunidad de seres humanos, que fueron enviados allí varios siglos antes ante la inminente destrucción del planeta Tierra como consecuencia de la transformación del Sol en una nova. Los primeros humanos se enviaron cuando todavía eran embriones, en una pequeña nave espacial tripulada por robots que se encargaban de supervisar el desarrollo embrionario. Se trataba de una de

Estos son los viajes de la nave estelar Enterprise. Sus cinco años de misión: explorar nuevos y extraños mundos, en busca de nueva vida y nuevas civilizaciones, llegar hasta donde ningún ser humano ha llegado nunca.

STAR TREK (INTRODUCCIÓN)

tantas naves enviadas a aquellos planetas que los científicos habían considerado habitables. A lo largo de seis centurias, aquella comunidad logró adaptarse al planeta y desarrollarse, siendo la serenidad, la estabilidad y el poseer una cultura ajena a cualquier tipo de creencia religiosa o mística sus principales rasgos de identidad. Los thalassanos reciben la visita de la nave espacial interestelar Magallanes, que transporta a un millón de seres humanos en estado de hibernación, procedentes igualmente de la Tierra y con destino al planeta Sagan 2. La novela, en esencia, exploraba el impacto producido por el contacto entre dos culturas tan distintas.

LAS EXPEDICIONES INTERESTELARES EN LA GRAN PANTALLA

Las historias sobre la presencia humana más allá de nuestro sistema solar también han trascendido a la literatura, bien mediante adaptaciones cinematográficas de novelas y series de televisión, bien a partir de historias escritas específicamente como base para el rodaje de largometrajes.

Un ejemplo muy popular lo constituyen las diferentes películas ambientadas en el universo de *Alien*, una saga cuyo desarrollo abarca ya cuarenta años, existiendo planes definidos para su continuación en la próxima década. Las historias de *Alien* exploran, además de la hibernación humana, el concepto de procesador atmosférico diseñado para hacer respirable la atmósfera de otros cuerpos celestes y fomentar así la presencia humana más allá de nuestro sistema solar. Además, abordan la incorporación de robots humanoides a las tripulaciones de las naves espaciales, al objeto de realizar tareas complementarias a las efectuadas por los seres humanos. Un año antes de que *Alien* viera la luz en los cines, se estrenó la versión cinematográfica de *Star Trek*, una saga creada por Gene Roddenberry y que originalmente surgió como serie en la pequeña pantalla en la segunda mitad de la década de 1960. En esta época el interés por la exploración del espacio se había incrementado, tras el lanzamiento del Sputnik 1, el primer satélite artificial de la historia, y vivió un momento ál-

LA BESTIA ESTELAR

El argumento de *Alien* cuenta una historia terrorífica ambientada en un futuro no muy lejano. La astronave comercial Nostromo, tripulada por siete astronautas, se encuentra realizando su viaje interestelar de regreso a la Tierra cuando intercepta una señal de origen extraterrestre procedente de una pequeña luna en la constelación de Reticulum. Su tripulación es despertada de su hibernación para aterrizar allí e investigar la fuente de emisión. Uno de sus integrantes es atacado por un organismo alienígena, que libera en su interior un embrión. La gestación culmina con el nacimiento de una nueva entidad y la consecuente muerte de su anfitrión. De aspecto ciertamente antropomorfo, este ser escapa al control de la tripulación, amenazando sus vidas. *Alien*, dirigida por Ridley Scott, se estrenó en 1979 y abrió las puertas a una nueva forma de ficción: el terror espacial. La historia continuó con otras tres películas más, *Aliens* (1986), *Alien³* (1991) y *Alien: resurrección* (1997), y dos precuelas, tituladas *Prometheus* (2012) y *Alien: Covenant* (2017).

Los padres de la historia

El relato que dio origen a la saga *Alien* es fruto de la colaboración de los escritores Dan O'Bannon y Ronald Shusett. O'Bannon estudió cinematografía en la Universidad Estatal de California (USC), donde conoció a John Carpenter, quien estaba rodando una película de ficción espacial como trabajo de tesis. O'Bannon colaboró con Carpenter en aquella cinta, que llegó a los cines con el título de *Estrella Oscura*. Por su parte, Shusett, que había estudiado teatro en la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), tras ver *Estrella Oscura* decidió contactar con sus directores. Shusett trabó muy buena relación con O'Bannon y ambos decidieron establecer una línea de colaboración, que se inició con una historia de terror espacial cuyo primer acto O'Bannon había esbozado previamente en veintinueve páginas. Aquel borrador constituía el germen de *Alien*.



Escena de la película *Alien* en la que los pasajeros de la nave Nostromo examinan los restos de lo que parece ser una nave espacial alienígena.

gido durante los años en que se llevaron a cabo las expediciones humanas con destino a la superficie lunar, en el marco del programa estadounidense Apolo.

Star Trek se centra en las expediciones emprendidas por una tripulación de seres humanos a bordo de la nave estelar Enterprise, con el propósito de explorar nuevos mundos y hallar nuevas formas de vida. Tanto la serie como las incontables películas que la sucedieron, están ambientadas en una época en la que la humanidad ha establecido relaciones con multitud de civilizaciones extraterrestres, lo que condujo a la fundación de la llamada Federación Estelar, una suerte de Naciones Unidas integrada por representantes de las distintas civilizaciones del universo conocido.

En la misma época en la que *Star Trek* se emitía en televisión, se abría paso en la pequeña pantalla otra serie que también abordaba el ámbito de las misiones más allá de nuestro sistema solar. Se trataba de *Lost in Space* (*Perdidos en el espacio*), creada y producida por Irwin Allen. Integrada por ochenta y tres episodios distribuidos en tres temporadas, la serie contaba la historia del doctor Robinson, un astronauta que, junto a su familia, un piloto de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos y un robot, emprendían un viaje a bordo de la nave Júpiter 2 con destino a un planeta remoto en órbita alrededor de la estrella Alfa Centauri, con la esperanza de poder establecerse en él, dado que en la época en la que transcurría la historia (año 1997), la Tierra sufría una grave sobrepoblación humana. Un intento de sabotaje de la nave provocó que esta se desviase de su rumbo. En 1998 llegó su adaptación a la gran pantalla, dirigida por Stephen Hopkins y escrita por Akiva Goldsman, que incorporó algunos cambios significativos como, por ejemplo, la fecha en que suceden los acontecimientos (2058 en lugar de 1997). Además, incluyó ciertos tributos a la producción televisiva, así como la participación de algunos de sus protagonistas.

El género infantil también se ha adentrado en las profundidades del espacio. Al calor de películas como *Encuentros en la tercera fase* (1977) y *E.T. el extraterrestre* (1982), ambas dirigidas por el genial Steven Spielberg, otros populares directores como

Joe Dante también han abrazado el género espacial de ficción con cintas como *Exploradores*, escrita por Erik Luke y estrenada en el año 1985, que cuenta la historia de tres muchachos que, a través de una serie de extraños sueños, reciben las instrucciones para construir una nave espacial a partir de elementos domésticos, a la que bautizan con el nombre de Thunder Road («el camino del trueno»), en honor al título de una canción de Bruce Springsteen. Tras varios ensayos previos, abandonan con ella nuestro sistema solar para entrar en contacto con una raza alienígena, la cual ha aprendido nuestro lenguaje y costumbres a través de las ondas de radio que continuamente escapan de nuestro planeta hacia el espacio exterior.

Un accidente durante un vuelo interestelar es el punto de partida de la película *Pitch Black*, dirigida por David Twohy y basada en una historia escrita por Jim y Ken Wheat. Estrenado en 2004, el largometraje se centra en las aventuras de los tripulantes de la nave mercante Hunter Gratzner que, rumbo al sistema solar Tangier, sufre el impacto de una lluvia de partículas de origen cometario que dañan gravemente el fuselaje del vehículo. Con cuarenta tripulantes a bordo en estado de hibernación, la nave se ve obligada a hacer un aterrizaje de emergencia en un planeta desértico, situado en un sistema solar con tres estrellas. El astro, que se encuentra iluminado por los soles continuamente —salvo breves periodos de eclipse que tienen lugar cada veintidós años—, está poblado por una serie de animales voladores de extraordinaria agresividad, que amenazan con acabar con la vida de los supervivientes.

Las misiones interestelares parecen estar viviendo un auge en el mundo del cine en la segunda década del presente siglo. En 2009 se estrenó la primera parte de una nueva saga espacial, *Avatar*, escrita y dirigida por James Cameron, que se sitúa en el año 2154, una época en la que escasean los recursos naturales en la Tierra y la humanidad se ve obligada a obtenerlos en otros cuerpos celestes, entre ellos Pandora, un planeta situado en el sistema estelar de Alfa Centauri. Además de varias precuelas de la saga *Alien*, se han rodado otros largometrajes espaciales, como *Interstellar*, dirigida por Christopher Nolan, y *Passengers*, de Morten Tyldum.

Interstellar, estrenada en 2014, está ambientada en un futuro en el que la Tierra sufre una gran crisis de recursos naturales, lo que obliga a un grupo de científicos de la NASA a poner en marcha diversas misiones con destino a planetas extrasolares, con el propósito de recopilar información sobre la habitabilidad de tales cuerpos celestes. Lejos de emplear sistemas de propulsión que podríamos considerar convencionales, las naves espaciales de *Interstellar* viajan hasta sus planetas de destino a través de lo que se conoce como *agujeros de gusano*, dos puntos situados respectivamente en lugares remotos del espacio, y conectados a través de un agujero o puente producido en el continuo espacio-tiempo.

Dos años después del de *Interstellar* tuvo lugar el estreno de *Passengers*, basada en una historia escrita específicamente para la película por Jon Spaihts, vinculado también al universo de *Alien* (es coguionista de *Prometheus*, una de las precuelas de la saga). *Passengers* cuenta la historia de una expedición emprendida por la nave Avalon, que transporta en estado de hibernación a su tripulación y a un pasaje integrado por más de cinco mil colonos, con destino al planeta extrasolar Homestead II. El viaje, cuya duración estimada es de 120 años, sufre una incidencia, y dos de sus tripulantes despiertan de su letargo 90 años antes de llegar a su destino.

Con más o menos acierto en los argumentos y en las tecnologías expuestas, todos y cada uno de estos ejemplos ponen de manifiesto no solo el interés del ser humano por el espacio, sino también el anhelo por ampliar las fronteras del conocimiento y comprobar si nuestra especie, con el transcurso del tiempo y con la ciencia y la tecnología como bases, es capaz de abandonar los lazos que nos unen a nuestro sistema solar y adentrarse en lo más profundo y desconocido del espacio, en busca de hogares potenciales para las generaciones venideras, una vez que las condiciones ambientales de nuestro planeta lo hagan completamente inhabitable.

CAPÍTULO 2

Planetas extrasolares

Hasta donde somos capaces de observar, el universo es ilimitado, y está poblado por miles de millones de galaxias. Solo en la Vía Láctea, existen en torno a doscientos mil millones de soles. La lógica nos dice que la posibilidad de que haya planetas orbitando otras estrellas es muy alta, pero la confirmación de su existencia no llegó hasta la década de 1990.

La mayoría de las novelas y buena parte de las producciones cinematográficas que abordamos en el capítulo anterior vieron la luz mucho antes de que la ciencia pudiera confirmar si, efectivamente, existían otros planetas más allá de nuestro sistema solar. En el año 1992, los astrofísicos Aleksander Wolszczan y Dale Frail encontraron la respuesta, al detectar la presencia de tres exoplanetas, también denominados planetas extrasolares, orbitando una estrella de neutrones llamada PSR 1257+12. Este tipo de astros se caracteriza por tener un comportamiento pulsante, por lo que se conocen como *púlsares*. No parecía, en principio, el lugar en el que encontrar planetas extrasolares, dado que los púlsares generan un entorno espacial bastante agresivo, principalmente caracterizado por unas intensas emisiones de radiación, letales para cualquier forma de vida conocida. Pero ¿existirían planetas orbitando en torno a estrellas «normales»?

La incógnita no tardó mucho en despejarse. Tan solo tres años después del hallazgo de Wolszczan y Frail, los astrofísicos de la Universidad de Ginebra (Suiza) Michel Mayor y Didier Queloz descubrieron ciertas anomalías en torno a 51 Pegasi, una estrella perteneciente a la denominada *secuencia principal*, una clasifi-

cación que engloba a la mayoría de estrellas que pueblan nuestra galaxia, entre las que se incluye nuestro Sol, cuyo tamaño es enano en comparación con las dimensiones de otros astros como las gigantes rojas. Las anomalías detectadas por Mayor y Queloz se debían, presumiblemente, a la presencia de un cuerpo de dimensiones planetarias orbitando aquella estrella.

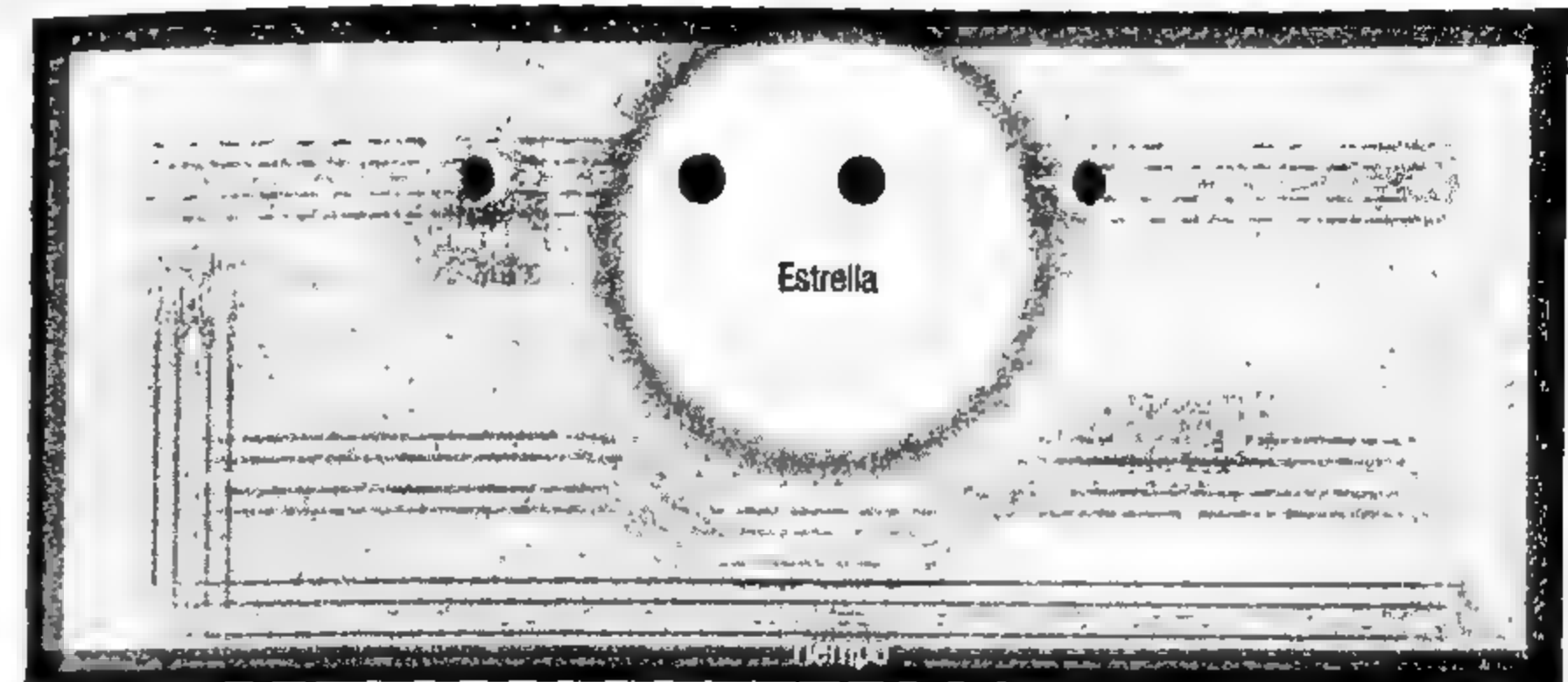
No obstante, la ciencia siempre precisa de la confirmación de un hallazgo a través de fuentes adicionales, y esta vino de la mano de otro equipo de astrofísicos, liderados por Geoffrey Marcy y Paul Butler, cuyas observaciones realizadas desde el Observatorio Lick (California, Estados Unidos) no dejaron lugar a dudas. Aquel planeta, que pasó a denominarse técnicamente 51 Pegasi b aunque popularmente se conoce como Dimidium, tiene aproximadamente la mitad de la masa de Júpiter. Su periodo orbital, es decir, el tiempo que tarda en girar en torno a su estrella, es de tan solo cuatro días, de lo que se infiere que este se encuentra ocho veces más cerca de su sol de lo que Mercurio lo está del nuestro. Desde su detección, el número de exoplanetas hallados se cuenta por miles, descubriéndose nuevos candidatos cada semana.

LAS ESTRELLAS ILUMINAN EL CAMINO

Dado su reducido tamaño y su excesiva distancia a la Tierra, la detección de planetas extrasolares se realiza, principalmente, mediante observación indirecta, es decir, midiendo los efectos que el planeta provoca en su estrella matriz. Existen varias técnicas para hacerlo, entre ellas el estudio de la variación de su brillo causada por el paso del planeta delante de ella, lo que se denomina técnica de tránsitos (figura 1). Otro de los métodos, conocido como técnica de velocidad radial, mide el «balanceo» que la estrella experimenta como consecuencia de la atracción gravitatoria ejercida sobre ella por el planeta (figura 2).

Sin embargo, el 13 de noviembre de 2008 pasó a los anales de la historia de la astronomía por ser el día en que se hizo pública la primera imagen de un exoplaneta obtenida mediante observación directa y en el rango de la luz visible del espectro (véase la foto-

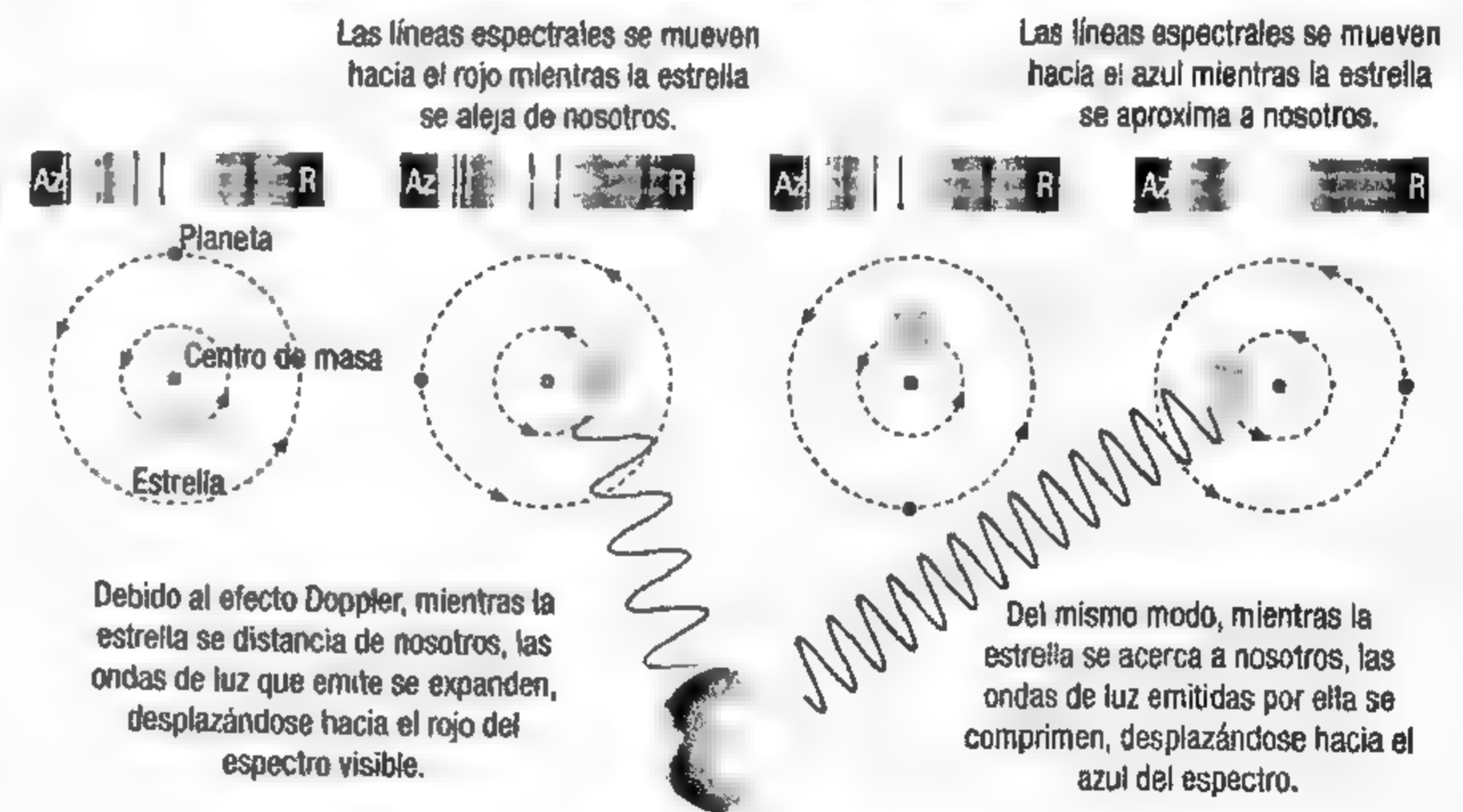
FIG 1



Técnica de tránsitos para la detección de planetas extrasolares, a partir de la cual se determina la presencia de un planeta midiendo la pérdida periódica de brillo de su estrella matriz, en los momentos en que aquel transita por delante de ella.

FIG. 2

El planeta y su estrella matriz orbitan en torno a un centro de masa común.



Técnica de velocidad radial. La fuerza gravitatoria ejercida por el planeta provoca pequeños movimientos en su estrella matriz. Debido al efecto Doppler, esos pequeños movimientos quedan reflejados en el espectro y pueden ser detectados.

MAYOR, QUELOZ Y LOS NUEVOS MUNDOS DEL COSMOS

Michel Mayor y Didier Queloz se hicieron mundialmente conocidos en la segunda mitad de la década de 1990 por ser los descubridores del primer planeta extrasolar en órbita alrededor de una estrella similar a nuestro Sol: 51 Pegasi b. Este hallazgo los hizo merecedores de un gran reconocimiento internacional, traducido en la concesión de diversos premios y distinciones.

Un veterano astrofísico

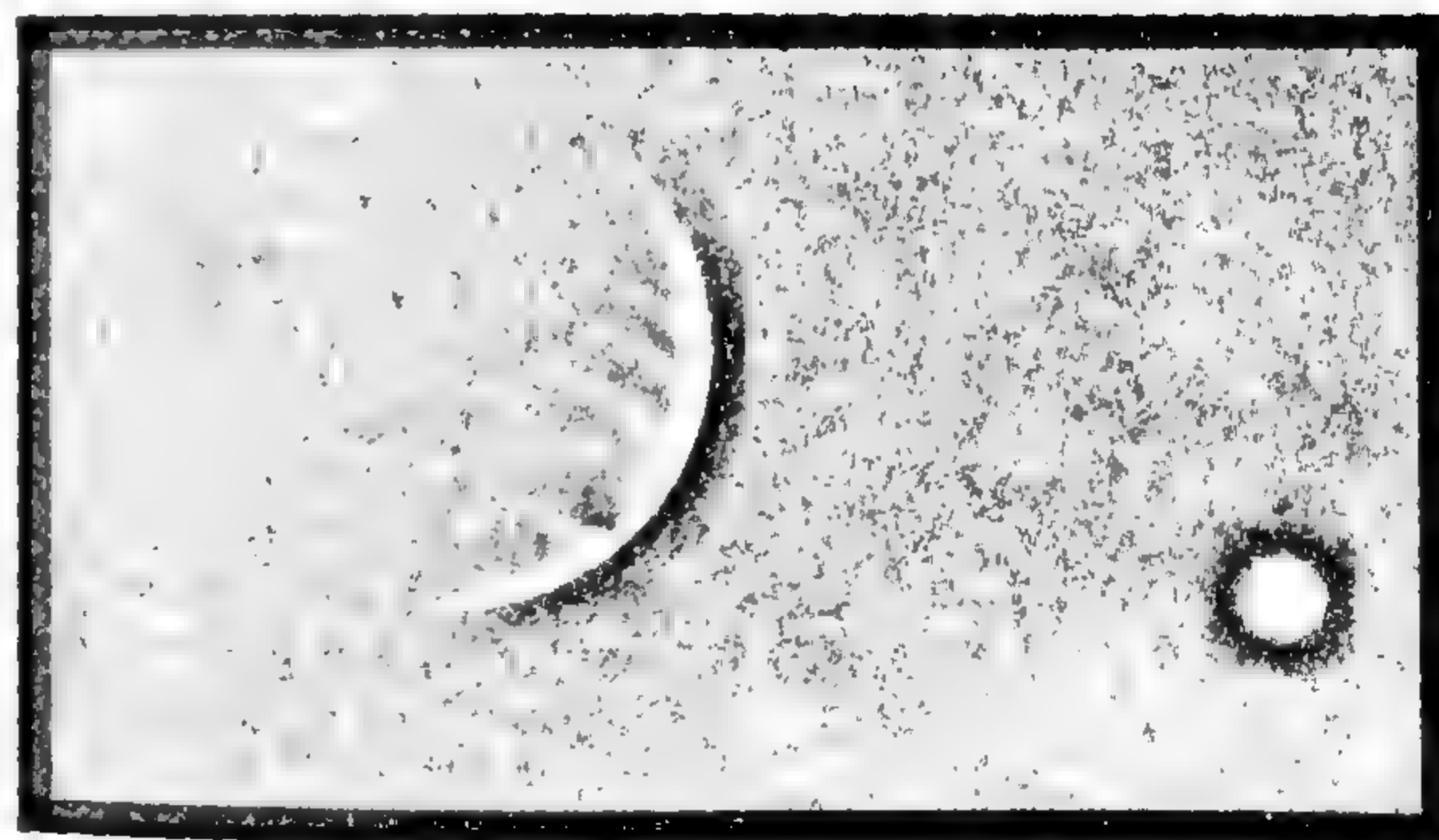
Doctor en Astronomía, Michel Mayor nació en la localidad suiza de Lausana, el 12 de enero de 1942. Su tesis doctoral estaba orientada a intentar establecer una relación entre las propiedades cinemáticas de las estrellas en las proximidades del sistema solar y la estructura espiral de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Entre 1971 y 1984, trabajó en el Departamento de Astronomía de la Universidad de Ginebra como investigador asociado. En 1988, la institución le nombró profesor titular, cargo que desempeñó hasta su jubilación en 2007, aunque desde entonces sigue trabajando como profesor emérito, y llevando a cabo estudios y descubrimientos sobre exoplanetas. Michel Mayor también ha realizado investigaciones en otras áreas como instrumentación astronómica, estructuras galácticas y dinámica de los cúmulos estelares de disposición globular, entre otras. Además, es coautor del libro titulado *Los nuevos mundos del cosmos* (2001), una obra centrada en el descubrimiento y estudio de los exoplanetas.

Un joven y prolífico descubridor de exoplanetas

Didier Queloz nació el 23 de febrero de 1966, y es uno de los astrofísicos que más planetas extrasolares ha descubierto, realizando principalmente sus investigaciones en el Grupo de Astrofísica del Laboratorio Cavendish (Cambridge, Reino Unido) y en la Universidad de Ginebra. Durante su doctorado en esta última institución en 1995, él y su director de tesis, Michel Mayor, descubrieron el primer exoplaneta en torno a una estrella perteneciente a la secuencia principal. En un ejercicio para mejorar sus habilidades de cálculo, Queloz realizó las medidas de la velocidad radial de la estrella 51 Pegasi, a partir de las cuales pudo determinar el periodo orbital del planeta que giraba a su alrededor, que era de tan solo 4,2 días. Entre las numerosas distinciones que le han sido concedidas se encuentra el galardón Fronteras del Conocimiento, de la Fundación BBVA, obtenido en 2011 y compartido con Michel Mayor.

El hallazgo de 51 Pegasi b

El descubrimiento del primer planeta extrasolar orbitando en torno a una estrella de la secuencia principal supuso toda una revolución científica. Este hallazgo no solo proporcionó una nueva perspectiva al estudio del universo, sino que amplió considerablemente las posibilidades de encontrar vida en otros mundos ajenos a nuestro sistema solar. Gracias a los esfuerzos de Mayor, Queloz y otros astrónomos, hoy tenemos un concepto del cosmos sensiblemente diferente al que teníamos hace treinta años.

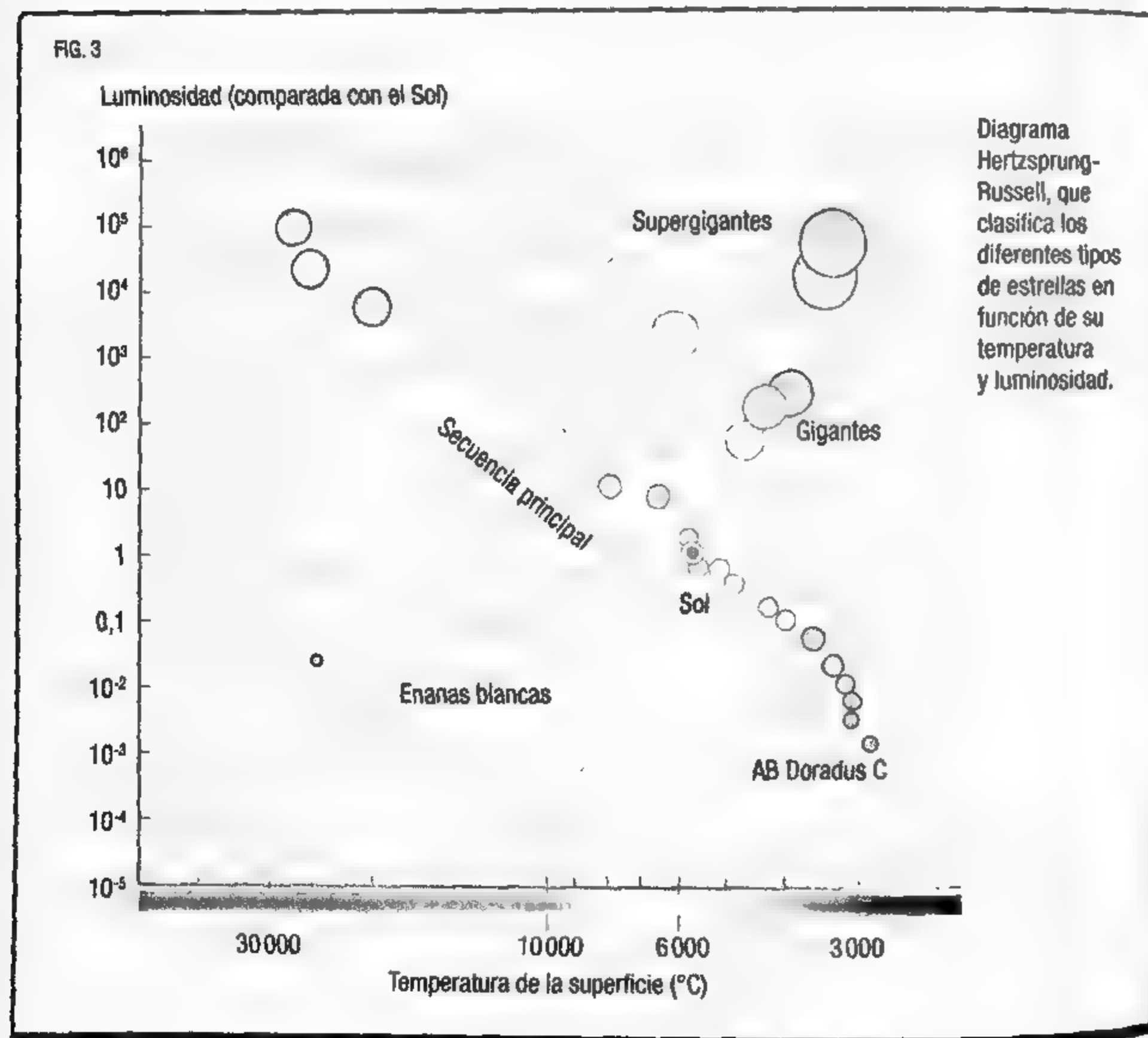


Arriba, los astrofísicos suizos Didier Queloz (izquierda) y Michel Mayor (derecha) posan ante uno de los telescopios del observatorio de La Silla, en Chile, en el año 2010. Debajo, ilustración de 51 Pegasi b y su estrella.

grafía superior de la página 43). Captada por el telescopio Hubble, un ingenio fruto de la cooperación entre la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA), en ella se apreciaba un cuerpo en órbita alrededor de la estrella Fomalhaut, situada a veinticinco años-luz de nuestro sistema solar, que fue bautizado como Fomalhaut b.

La secuencia principal

Si representásemos todas las estrellas del firmamento en un diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 3), que relaciona la luminosidad con la temperatura superficial, observaríamos que la mayoría



se concentran en una banda bien definida y continua, llamada secuencia principal. A ella pertenece, entre otras, nuestro Sol.

Ordenadas de mayor a menor en función de su espectro —relacionado con su temperatura—, y basándose en la clasificación Morgan-Keenan, la más empleada para la tipificación estelar, existen siete tipos de estrellas, definidos por las letras O, B, A, F, G, K y M. Cada una lleva asignado un dígito que indica su temperatura, del 0 (las más calientes) al 9 (las más frías). Asimismo, el rango de luminosidad, de mayor a menor, se representa con números romanos, el I corresponde a las más brillantes y V a las más débiles, perteneciendo estas últimas a la secuencia principal. Nuestro Sol es una estrella de tipo G2V.

Los parámetros de las estrellas pertenecientes a la secuencia principal se recogen en la tabla siguiente, en la que se destacan los datos correspondientes al Sol, que se toma como referencia:

Clase estelar	Radio (Sol = 1,00)	Masa (Sol = 1,00)	Luminosidad (Sol = 1,00)	Temperatura (°C)	Ejemplos
O6	18	40	500 000	~ 37 700	Theta 1 Orionis C
B0	7,4	18	20 000	~ 29 700	Phi Orionis
B5	3,8	6,5	800	~ 16 100	Pi Andromedae A
A0	2,5	3,2	80	~ 10 500	Alpha Coronae Borealis A
A5	1,7	2,1	20	~ 8 300	Beta Pictoris
F0	1,3	1,7	6	~ 7 000	Gamma Virginis
F5	1,2	1,3	2,5	~ 6 200	Eta Arietis
G0	1,05	1,10	1,26	~ 5 600	Beta Comae Berenices
G2	1,00	1,00	1,00	~ 5 500	Sol
G5	0,93	0,93	0,79	~ 5 300	Alpha Mensae
K0	0,85	0,78	0,40	~ 5 000	70 Ophiuchi A
K5	0,74	0,69	0,16	~ 4 100	61 Cygni A
M0	0,63	0,47	0,063	~ 3 600	Gliese 185
M5	0,32	0,21	0,0079	~ 2 800	EZ Aquarii A
M8	0,13	0,10	0,0008	~ 2 300	Estrella Van Biesbroeck

LA BÚSQUEDA DE OTRAS TIERRAS

Durante los primeros años que siguieron al descubrimiento de los exoplanetas 51 Pegasi b y Fomalhaut b, los cuerpos hallados parecían tener un perfil semejante. Se trataba de astros masivos, gaseosos y muy próximos a sus respectivas estrellas matriz. Tales características hicieron que los científicos definieran este tipo de planetas con el término popular de *júpiteres calientes*.

Desde entonces, los avances tecnológicos han permitido la construcción de telescopios e instrumentos más precisos y potentes, lo que ha conllevado un aumento significativo del ritmo de descubrimiento de nuevos exoplanetas, no solo masivos y gaseosos, sino también más pequeños y rocosos, con masas varias veces superiores a la de la Tierra y conocidos como *supertierras*.

El 7 de marzo de 2009, la NASA lanzó desde Cabo Cañaveral (Florida) un telescopio con el que pretendía localizar en el firmamento planetas de un tamaño similar al de la Tierra. El ingenio fue bautizado con el nombre de Kepler en honor al astrónomo que determinó a principios del siglo XVII las leyes que rigen el movimiento planetario, el alemán Johannes Kepler. El telescopio se encuentra situado en una órbita solar «de persecución terrestre», es decir, se mueve en la misma órbita en la que lo hace la Tierra alrededor del Sol, pero situándose por detrás de ella en su desplazamiento. Su campo de observación abarca más de cien mil estrellas, comprendiendo parte de las constelaciones de Lyra (la Lira) y Cygnus (el Cisne), una región densamente poblada por estrellas similares a nuestro Sol, y emplea el tránsito planetario como técnica de detección. Recordemos que este método se basa en estudiar el brillo de las estrellas y advertir cualquier variación en él, por mínima que sea, a partir de la cual se puede deducir la existencia de planetas en sus respectivas órbitas. En abril de 2014, el Kepler detectó el primer planeta de dimensiones similares a la Tierra, orbitando una estrella denominada Kepler-186, situada a unos quinientos años-luz de distancia de nuestro sistema solar, en la constelación del Cisne. Este planeta, cuya designación es Kepler-186f, es el quinto descubierto en torno a la referida estrella, y sus características lo hacen potencialmente habitable.

EL KEPLER EN CIFRAS

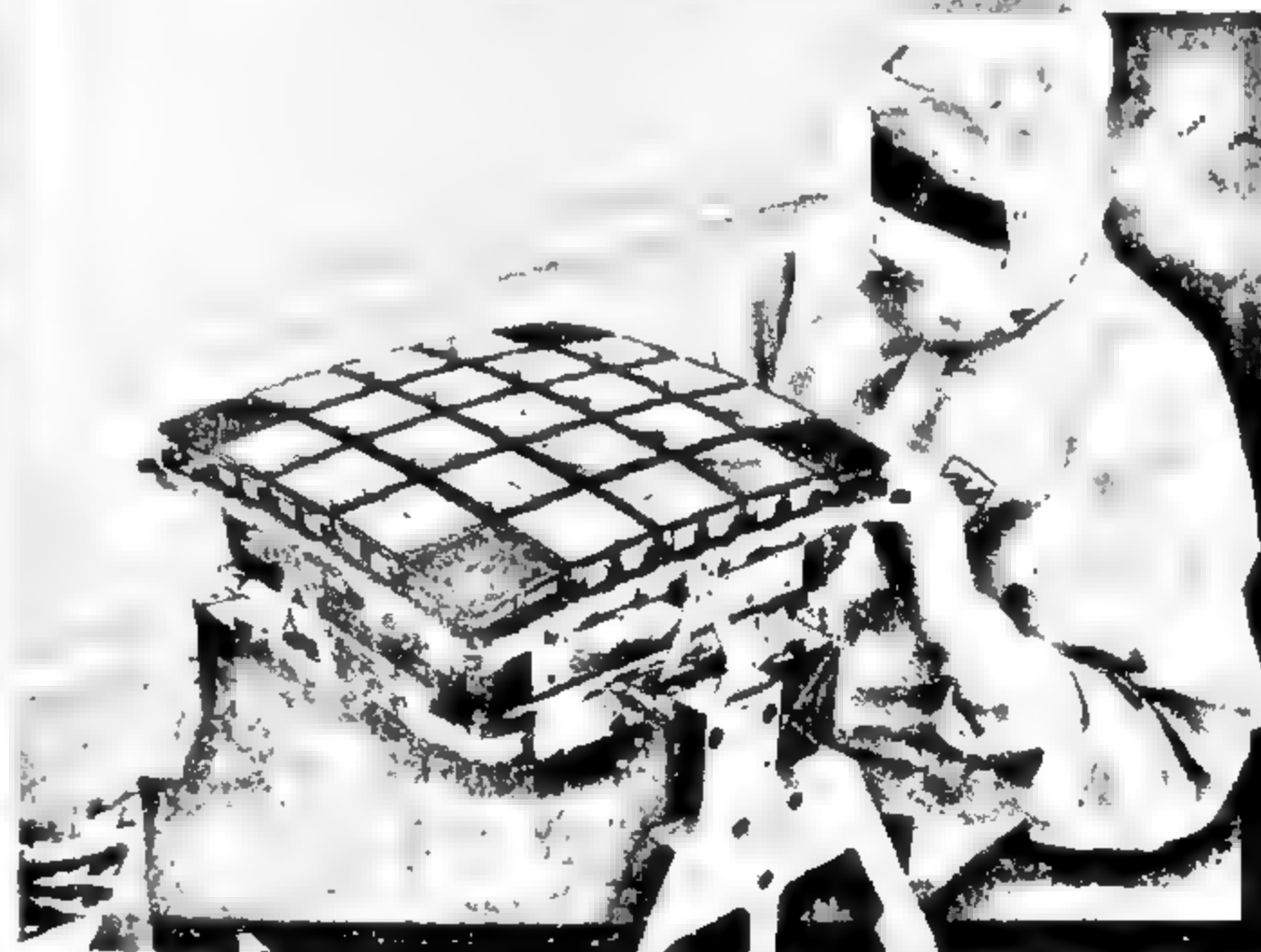
Lanzado el 7 de marzo de 2009, el Kepler tiene unas dimensiones significativamente inferiores a las de otros telescopios espaciales, como el popular Hubble: tiene un diámetro de 2,7 m y una altura de 4,7 m. En el momento del lanzamiento, el observatorio pesaba un total de 1 052,4 kg, de los cuales 562,7 estaban constituidos por el propio ingenio, 478 por su fotómetro y 11,7 por su combustible, la hidracina. Este último se reduce en función de las sucesivas correcciones que el Kepler debe realizar en su órbita.

Alimentado por el Sol

El Kepler, como todos los observatorios orbitales, produce energía eléctrica a partir de paneles solares. Dispone de cuatro, constituidos, en su conjunto, por 2 860 células fotovoltaicas, que abarcan en total una superficie de 10,2 m², con capacidad para generar una potencia eléctrica de 1 100 W. Una batería de litio recargable, de 20 Ah (amperios hora), es la responsable de almacenar la energía eléctrica producida por los paneles solares del telescopio.

Un solo instrumento

El Kepler cuenta con un fotómetro como único instrumento, dotado de 42 sensores CCD, con una resolución superior a los 95 millones de píxeles, e integrado por un telescopio Schmidt, de 0,95 m de apertura, y un espejo principal de 1,4 m de diámetro. Sus características permiten al Kepler tener un campo de visión más de treinta mil veces superior al del telescopio Hubble, siendo capaz de realizar mediciones del brillo de cien mil estrellas en periodos de treinta minutos.



Un técnico inspecciona el dispositivo CCD antes de su instalación en el telescopio Kepler.

Existe un infinito número de mundos, algunos como este, otros diferentes.

EPICURO (CARTA A HERÓDOTO, CA. 300 A.C.)

De acuerdo con los datos hechos públicos en noviembre de 2013, el número de planetas extrasolares del tamaño de la Tierra situados en las regiones habitables generadas por sus respecti-

vas estrellas matriz dentro de la Vía Láctea podría aproximarse a los cuarenta mil millones, de los que once mil millones orbitarían en torno a estrellas similares a nuestro Sol. Las estadísticas suelen errar con frecuencia, pero si solo tuviéramos en cuenta

un uno por ciento de esas estimaciones, el resultado arrojaría una cifra de 110 millones de planetas como la Tierra, orbitando estrellas como nuestro Sol.

Mundos potencialmente habitables

Los planetas candidatos a reunir las condiciones necesarias para albergar vida se sitúan en una región denominada *zona de habitabilidad estelar* o zona habitable. Se trata de un rango de órbitas en las que la radiación emitida por la estrella matriz permite la existencia de agua líquida en cuerpos dotados de la suficiente presión atmosférica. Existen dos corrientes a la hora de determinar la zona habitable en torno a una estrella. La primera es la corriente conservadora, que restringe bastante el rango de órbitas. En el caso de nuestro sistema solar, establece la zona habitable entre 0,95 y 1,4 UA (símbolo de unidad astronómica, es decir, la distancia que existe entre la Tierra y el Sol). La segunda es la corriente optimista, y es más flexible a la hora de establecer ese rango de órbitas, situando la zona habitable en nuestro sistema solar entre 0,84 y 1,7 UA.

Hay, además, otros factores que determinan la habitabilidad de un planeta. El principal es el carácter de la estrella matriz. Si esta tiene un comportamiento variable o muy activo, como por ejemplo el propio de un púlsar o el de una estrella de tipo M de poca masa —muy propensas a emitir violentas llamaradas solares y una intensa radiación ultravioleta—, tales cambios im-

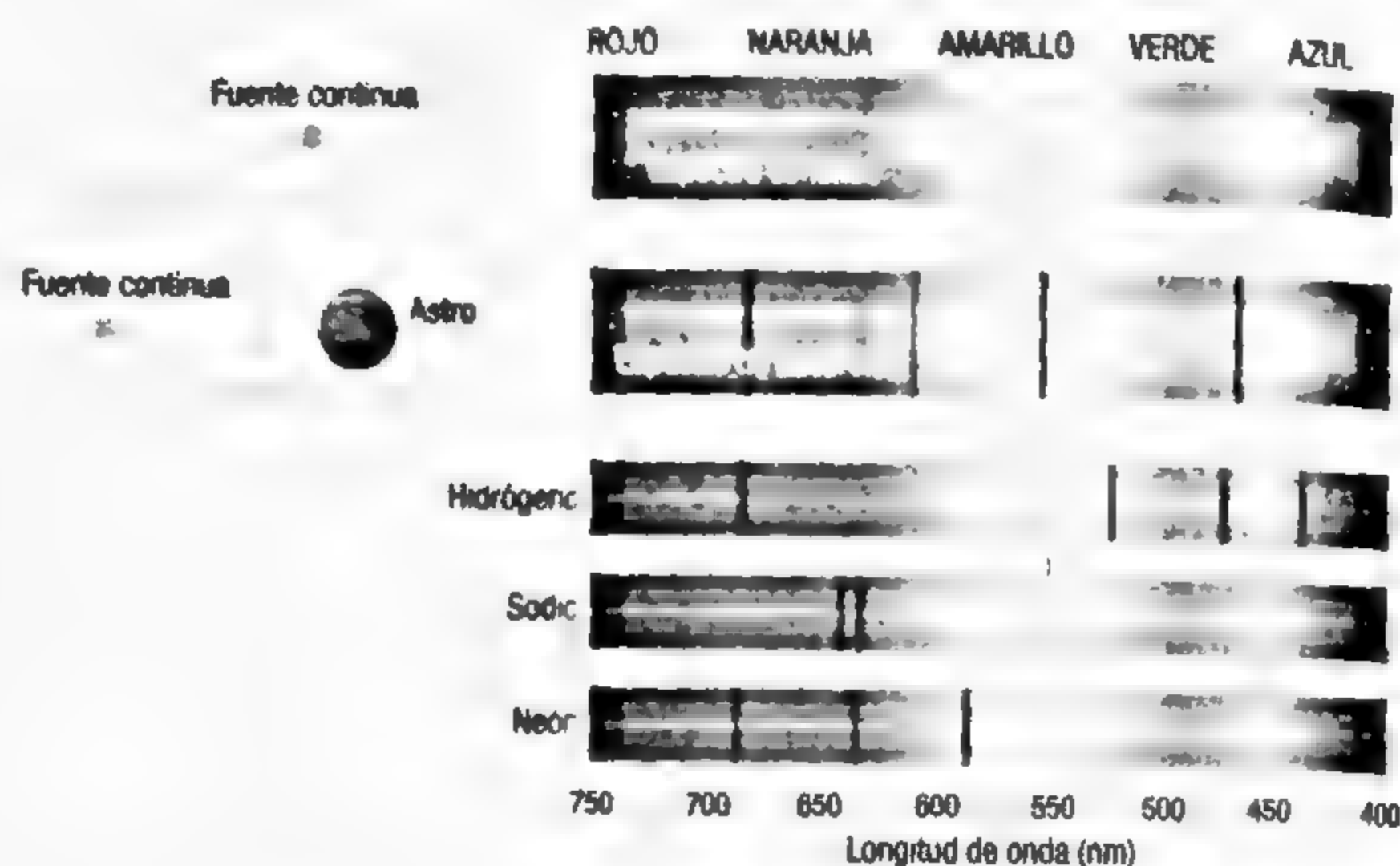
plicarían importantes trastornos en su entorno espacial, lo que podría impedir la existencia de zonas habitables.

En los últimos años se ha descubierto un nutrido grupo de planetas que, si bien se encuentran en las regiones habitables generadas por sus respectivas estrellas matriz, la mayoría de ellos podría no reunir las condiciones ambientales para su habitabilidad. ¿Cómo es eso posible? La clave está en las características de la atmósfera de dichos planetas. Podemos hallar ejemplos de esa misma situación en nuestro propio sistema solar. Nuestro vecino Marte se sitúa en la región habitable generada por el Sol, pero su composición atmosférica, baja presión, temperatura y radiación hacen del planeta un lugar inhóspito. El ejemplo contrario lo encontramos en Venus, que a pesar de no encontrarse estrictamente en la referida región, podría cumplir con los requisitos de habitabilidad de no tener una atmósfera tan densa y rica en dióxido de carbono, un gas que somete al planeta a un infernal efecto invernadero que genera temperaturas diurnas y nocturnas de 480 °C y 460 °C, respectivamente. Otros factores igualmente importantes son el movimiento de rotación y la inclinación del eje de los planetas, los cuales definen las condiciones climáticas reinantes en ellos.

Por tanto, para saber con mayor certeza si un planeta extrasolar es habitable, además de determinar la distancia a su estrella matriz, su rotación y su inclinación, es indispensable analizar la composición de su atmósfera, cuyos parámetros pueden conocerse durante los periodos en que el planeta transita por delante de su estrella, mediante espectroscopia. Esta técnica tiene una dificultad: solo puede aplicarse, de momento, a aquellos planetas que se ubican en los sistemas solares más próximos al nuestro. No obstante, el progreso de la tecnología permitirá avanzar en este sentido y medir la composición atmosférica de cuerpos cada vez más lejanos.

La luz es una fuente de información muy valiosa, a partir de la cual podemos conocer, entre otras cosas, la composición de un cuerpo celeste y de su atmósfera. La espectroscopia (figura 4) se basa en el estudio de la luz mediante su descomposición en las diferentes longitudes de onda. De este modo, se obtiene una amplia gama de colores (espectro continuo), en los que son apreciables

FIG. 4



La espectroscopia permite obtener información sobre las características de las estrellas y otros cuerpos celestes, a partir de la luz que emiten, reflejan o refractan. Analizando sus espectros de absorción, podemos determinar los elementos químicos presentes en los astros y en sus respectivas atmósferas, si las tuvieran.

unas líneas oscuras verticales (espectro de absorción), que nos proporcionan información sobre los elementos químicos presentes en aquellos cuerpos que emiten luz (estrellas) o la reflejan (planetas, lunas, asteroides y cometas), en función de la ubicación de tales líneas a lo largo del espectro. Gracias a la espectroscopia, se han podido detectar elementos como el hidrógeno y compuestos como el vapor de agua en los júpiteres calientes.

Los hallazgos más recientes

El 24 de agosto de 2016 se hizo pública la noticia del hallazgo de un planeta extrasolar, que orbita en la región habitable de la estrella Próxima Centauri, situada en la constelación de Centaurus (el Centauro), a tan solo 4,22 años-luz de la Tierra (el año-luz es

una medida que expresa la distancia que recorre la luz en un año, en torno a 9,5 billones de kilómetros). Denominado Próxima b, se trata de un exoplaneta con una masa similar a la de la Tierra. Su estrella matriz es una enana roja, de brillo muy débil, circunstancia que hace imposible su observación a simple vista desde nuestro planeta. Su temperatura es notablemente inferior a la de nuestro Sol, lo que permite que Próxima b, que se localiza relativamente cerca de su estrella y cuyo período orbital en torno a ella es de tan solo once días, reúna las condiciones necesarias para poder albergar agua en estado líquido, siempre y cuando esté dotado de la presión atmosférica suficiente.

El hallazgo fue posible gracias a las sucesivas observaciones realizadas con un espectrógrafo denominado HARPS desde La Silla, una montaña en pleno desierto de Atacama (Chile) donde se ubican unas instalaciones astronómicas pertenecientes al ESO (acrónimo, en inglés, de Observatorio Europeo Austral). La investigación se llevó a cabo en el marco de la campaña Pale Red Dot («punto rojo pálido»), desarrollada durante sesenta noches y complementada con observaciones realizadas desde otras instalaciones astronómicas. El astrónomo Guillem Anglada Escudé, de la Universidad Queen Mary de Londres, líder del equipo científico participante en la campaña, explicó en las fechas en las que se hizo público el hallazgo que las primeras señales de la existencia de un posible planeta fueron advertidas en el año 2013, pero su detección no pudo confirmarse de manera definitiva. Desde entonces, el equipo trabajó intensamente para realizar un mayor número de observaciones, empleando las instalaciones del ESO y de otras instituciones. La campaña Pale Red Dot invirtió casi dos años en su planificación.

El hallazgo de Próxima b se logró por la técnica de velocidad radial, que, como explicábamos al comienzo del capítulo, radica en medir el «balanceo» de la estrella matriz. En este caso, durante las sesenta noches de la campaña Pale Red Dot, los científicos advirtieron que, a veces, Próxima Centauri experimentaba una aproximación a nuestro sistema solar a una velocidad de 5 km/h (equivalente a la que alcanza una persona al caminar) y un posterior alejamiento a la misma velocidad. Este patrón regu-

lar de cambio en la velocidad radial se producía a intervalos de 11,2 días. Posteriores análisis del discreto efecto Doppler detectado en Próxima Centauri como consecuencia de esas aproximaciones y alejamientos, determinó la existencia del planeta, su masa (aproximadamente 1,3 veces la de la Tierra) y la distancia a su estrella matriz (en torno a los siete millones de kilómetros).

Las estrellas de clase M y de baja masa suelen ser muy activas y se caracterizan por emitir una intensa radiación ultravioleta, además de violentas llamaradas solares de rayos X, lo que seguramente hace de Próxima b un planeta difícilmente habitable. No obstante, los científicos están intentando determinar qué condiciones climáticas se dan en él, y es posible que determinadas regiones de su superficie ofrezcan el ambiente necesario para su habitabilidad. Próxima b es uno de los planetas candi-

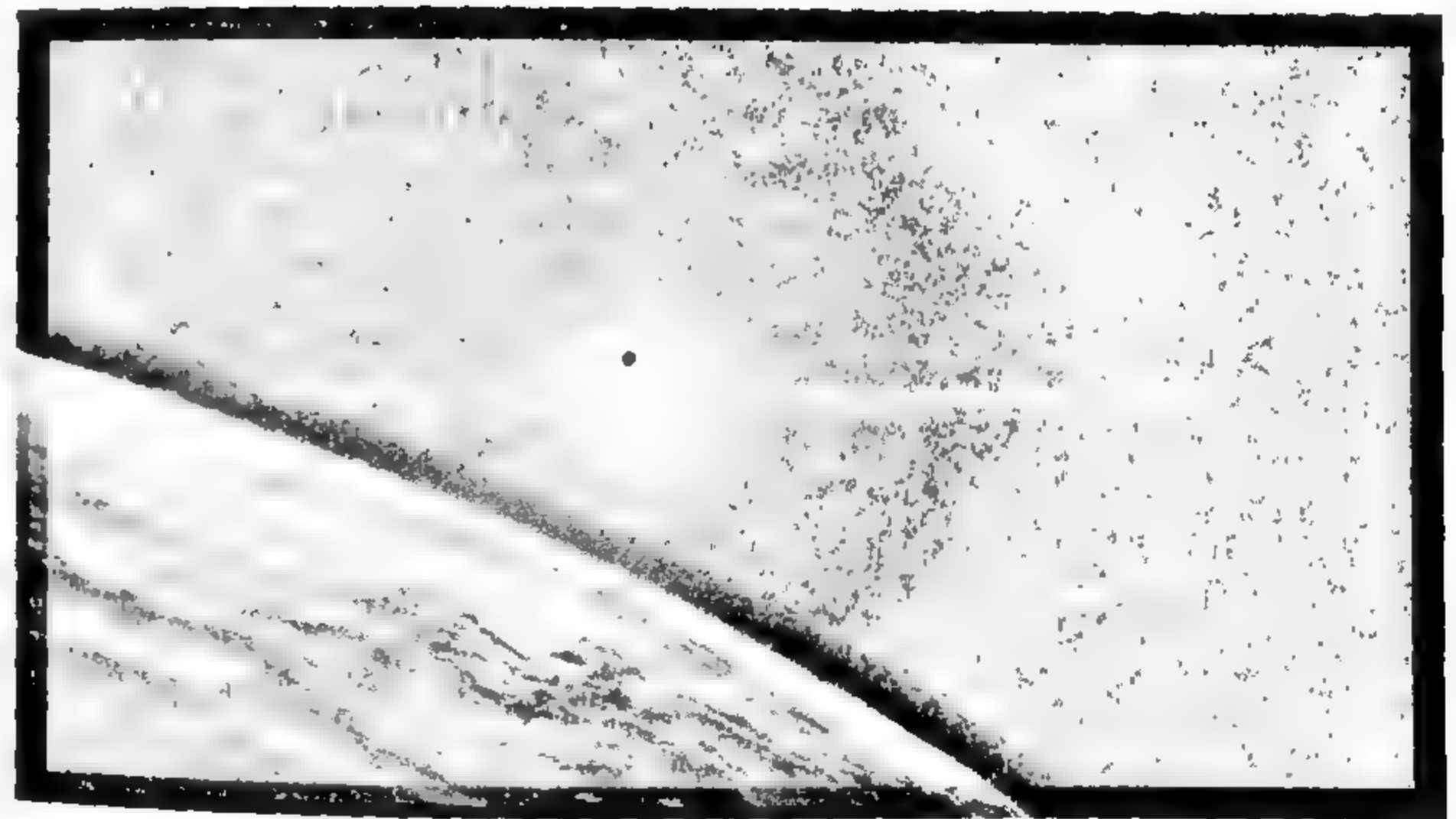
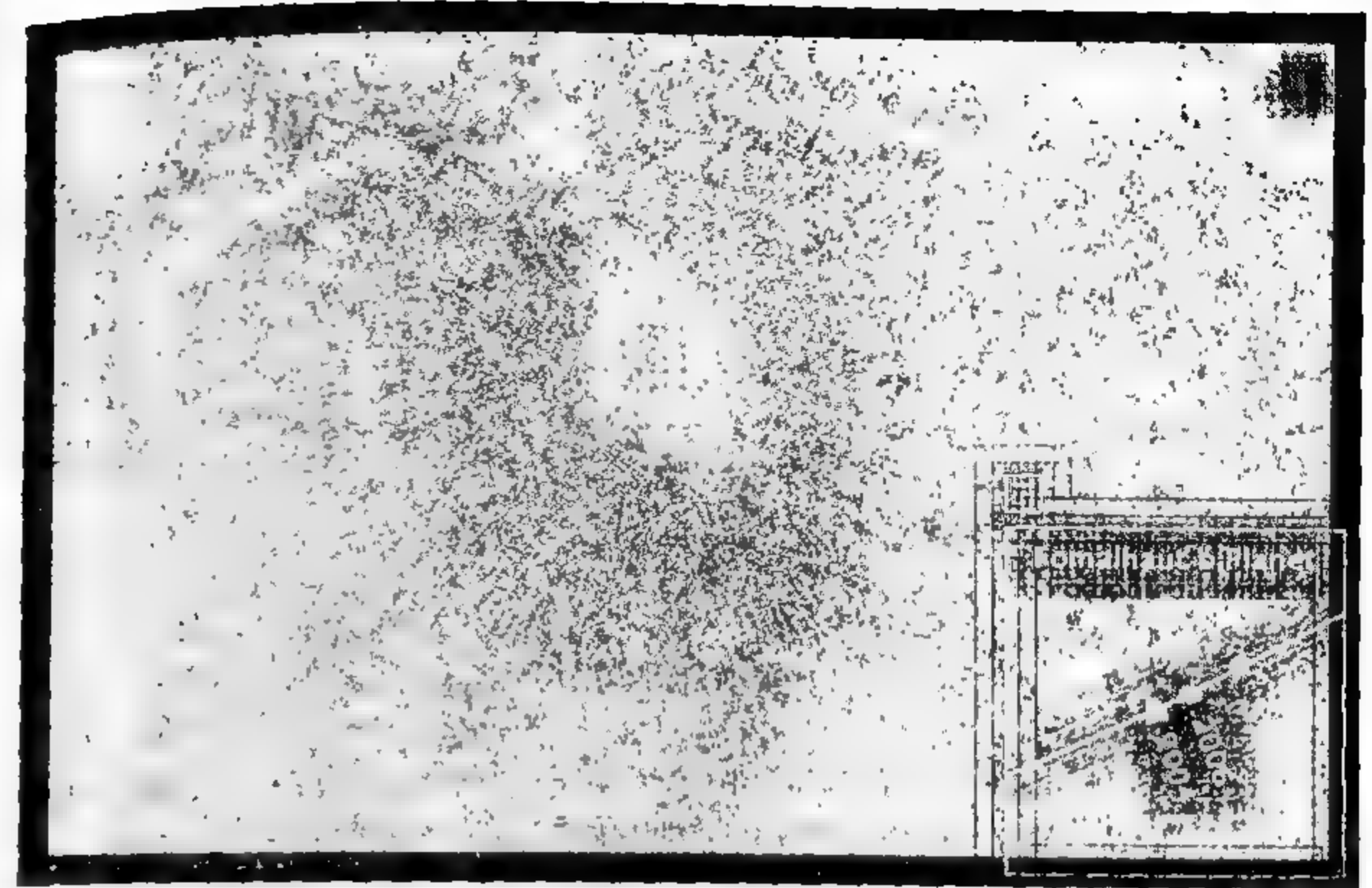
datos para su exploración robotizada, en el marco de iniciativas como la DEEP-IN de la NASA.

En mayo de 2016, científicos del ESO hicieron pública la noticia del hallazgo de tres nuevos exoplanetas de masa similar a la de la Tierra. Empleando el telescopio TRAPPIST (acrónimo, en inglés, de «pequeño telescopio de

planetesimales y planetas en tránsito»), ubicado también en el Observatorio de La Silla, los astrónomos pudieron determinar la existencia de estos cuerpos orbitando la estrella denominada TRAPPIST-1, situada en la constelación de Aquarius (Acuario), a unos cuarenta años-luz de nuestro sistema solar y descubierta mediante el referido telescopio (la imagen inferior de la página contigua muestra una recreación de este sistema solar). Observaciones adicionales realizadas por otras instalaciones como el VLT (siglas en inglés de «telescopio de gran extensión»), también localizado en La Silla, y por el observatorio espacial de infrarrojos Spitzer, de la NASA, permitieron confirmar la presencia de cuatro planetas más de características similares, tres de los cuales se encuentran en la región habitable generada por su estrella matriz. Los planetas en cuestión fueron bautizados con los nom-

Las siete maravillas de TRAPPIST-1 son los primeros planetas del tamaño de la Tierra que han sido hallados orbitando este tipo de estrellas.

MICHAEL GILLON



Arriba, primera imagen de un planeta extrasolar obtenida por observación directa, captada por el telescopio espacial Hubble. Debajo, ilustración que refleja el aspecto del sistema solar de TRAPPIST-1 observado desde las proximidades de uno de sus planetas.

bres de TRAPPIST-1e, TRAPPIST-1f y TRAPPIST-1g. Mediante el Spitzer, los científicos pudieron medir con precisión el tamaño de estos planetas del sistema TRAPPIST-1, y realizar las primeras estimaciones sobre la masa y densidad de seis de ellos. El séptimo es el más alejado del sistema, lo cual dificulta la obtención de datos. Además de con el Spitzer, se han comenzado a llevar a cabo observaciones de este sistema solar con el telescopio Hubble, al objeto de determinar si estos planetas están provistos de atmósfera y, de ser así, intentar averiguar su composición.

Los datos preliminares apuntan a que todos los exoplanetas que orbitan TRAPPIST-1 son de tipo rocoso. No se sabe, por el momento, si son ricos en agua o no, y en caso de que así fuera, si esta fluye en estado líquido sobre su superficie. Serán, por tanto, necesarias nuevas observaciones que despejen estas incógnitas. Por lo que se refiere al séptimo de los planetas, los científicos creen que podría tratarse de un mundo helado, aunque nuevas observaciones ayudarán a perfilar las características de este planeta extrasolar.

A diferencia de nuestro Sol, TRAPPIST-1 es una estrella que los científicos consideran enana ultrafría, por lo que la región habitable que esta genera se encuentra muy próxima a ella. Todos los planetas de su sistema se encuentran a una distancia notablemente inferior a la existente entre nuestro Sol y Mercurio. Además, los planetas ocupan órbitas muy próximas entre sí, de modo que un observador situado en la superficie de uno de ellos sería capaz de distinguir rasgos externos de los más cercanos, cuyo tamaño aparente en el firmamento sería superior al de nuestra Luna observada desde la Tierra.

La inminente puesta en marcha del telescopio espacial James Webb (JWST) de la NASA, cuya óptica es mucho más avanzada que la de cualquier otro observatorio orbital, será fundamental para obtener datos sensiblemente más precisos sobre las características de este y otros sistemas planetarios.

La información obtenida en este sentido en los próximos años por ingenios espaciales y por telescopios basados en la superficie terrestre será de vital importancia a la hora de elegir, en el futuro, qué mundos más allá de nuestro sistema solar serán candidatos para el asentamiento de nuestra especie.

En la siguiente tabla se exponen los planetas extrasolares que, hasta la fecha, han sido hallados en regiones habitables. Se trata de un reducido número de astros que nos dejaría pocas opciones para elegir un destino potencial. Además, la mayoría de ellos orbitan alrededor de estrellas de tipo M que, como explicábamos en líneas anteriores, se caracterizan por ser muy activas, lo que dificultaría la habitabilidad de estos planetas. En la tabla se incluye la Tierra en primer lugar, y sus respectivos parámetros como valores de referencia.

Exoplanetas situados en regiones habitables						
Nombre	Estrella matriz	Tipo estrella	Radio	T _{eq} (°C)	P _o (días)	D _{sol} (a.l.)
Tierra	Sol	G2V	1,00	-18	365,24	n/a
Proxima Centauri b	Proxima Centauri	M6Ve	0,8	-39	11,19	4,22
			1,1			
			1,4			
GJ 273 b	Luyten	M3.5V	?	-67 / 20	18,65	12,36
Kapteyn b*	Kapteyn	sdM1	1,2	-68	48,6	13
			1,6			
			2,1			
Wolf 1061 c	Wolf 1061	M3V	1,1	-50	17,9	13,8
			1,6			
			2,0			
Gliese 667Cc	Gliese 667C	M3V	1,1	3	28,14	23,62
			1,5			
			2,0			
TRAPPIST-1e	TRAPPIST-1	M8V	0,9	-22	6,1	39
TRAPPIST-1f	TRAPPIST-1	M8V	1,0	-73	9,2	39
TRAPPIST-1g	TRAPPIST-1	M8V	1,1	-75	12,4	39
Kepler-186f	Kepler-186	M1V	1,17	-85	129,94	561
Kepler-1229b	Kepler-1229	M7V	1,4	-60	86,8	769
Kepler-62 f	Kepler-62	K2V	1,41	-65	267,29	1200
Kepler-442 b	Kepler-442	K7V	1,34	-40	112,30	1120
Kepler-452 b	Kepler-452	G2V	1,50/1,63	-8 ⁺¹⁵ ₋₁₃	384,4	1402
Expresiones y abreviaturas T _{eq} : temperatura de equilibrio planetario. Es la temperatura teórica que tendría un planeta si este fuera considerado un cuerpo negro que recibe únicamente el calor de su estrella matriz, independientemente de si el planeta está dotado o no de atmósfera. P _o : periodo orbital. D _{sol} : distancia a nuestro Sol. a.l.: años-luz.						

El progreso tecnológico nos permitirá ampliar esta lista con nuevos exoplanetas, y conocer sus características con mayor detalle, lo que nos ayudará a sentar las bases del mapa que, en el futuro, servirá de guía a la especie humana en su viaje más allá de nuestro sistema solar.

CAPÍTULO 3

Más allá de la heliosfera

Para emprender el camino hacia las estrellas, antes es imprescindible conocer las características del medio interestelar y los fenómenos que tienen lugar en él. ¿Qué condiciones existen más allá de nuestro sistema solar? ¿Son tan agresivas como para impedir un viaje humano a los exoplanetas? Estas son, por ahora, preguntas sin respuesta.

Hasta no hace mucho tiempo, desconocíamos cuán amplia era el área en la que el Sol ejercía su influencia en el espacio. Hoy en día sabemos que no solo se circunscribe a nuestro propio sistema planetario, sino que se extiende mucho más allá, hasta distancias superiores a los quince mil millones de kilómetros, es decir, más de cien unidades astronómicas. Para hacernos una idea más completa, pensemos que la luz emitida por el Sol tarda más de catorce horas en llegar al límite del campo de influencia de nuestra estrella, y solo ocho minutos en alcanzar la Tierra.

Estas cifras, aunque nos puedan parecer inmensas, son ínfimas en términos astronómicos. Pongamos un ejemplo simple para comprenderlo mejor. Imaginemos que pudiéramos situarnos en la superficie del planeta extrasolar más cercano al nuestro, Próxima Centauri b, y observásemos desde allí nuestra estrella a simple vista, en el cielo nocturno. A pesar de separarnos tan solo cuatro años-luz del Sol, no seríamos capaces de vislumbrar esos límites de influencia, que quedarían eclipsados por el propio brillo emitido por nuestra estrella. En otras palabras, a esa distancia tan pequeña, si extendiéramos un brazo y sobre la yema de un dedo colocáramos un grano de sal, este bastaría

para eclipsar totalmente el Sol y todo el brillo emitido por él. En definitiva, el océano cósmico es tan extenso que se podría decir que una estrella es al universo lo que un átomo a un ser humano.

Para poder conocer con detalle las características reinantes en el medio interestelar, se hace imprescindible el envío de sondas espaciales robóticas dotadas de instrumentación científica. El estudio de dicho medio a distancia, a través de observaciones con telescopios instalados en la superficie terrestre, se antoja muy difícil, sobre todo por las limitaciones tecnológicas, que nos impiden, entre otras cosas, observar con detalle aquellos objetos que se sitúan más allá de la órbita de Neptuno, conocidos como objetos transneptunianos, y que se caracterizan por ser cuerpos helados de muy reducido tamaño.

LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA SOLAR

Todos los cuerpos celestes que integran nuestro sistema planetario orbitan en torno al Sol, una estrella de tipo medio con una longevidad estimada de diez mil millones de años, encontrándose ahora en el ecuador de su vida. Ocho son, por el momento, los planetas «clásicos» que giran alrededor de nuestra estrella, entendiéndose como clásicos aquellos cuerpos de morfología esférica y con una órbita bien definida, que no entra en intersección con las órbitas de otros planetas.

Una región poblada por rocas que no llegaron a conformar nuevos astros, llamada cinturón de asteroides y situada entre las órbitas de Marte y Júpiter, constituye la frontera entre el sistema solar interior (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) y el sistema solar exterior (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno).

Cuerpos de menor tamaño, cuyas respectivas órbitas sí entran en intersección con las de otros planetas, son los llamados plutoides o planetas enanos. Tal es el caso de Ceres, situado en el cinturón de asteroides, y Plutón, ubicado más allá de Neptuno, en el inicio de una región del espacio poblada por cuerpos pequeños y helados llamada cinturón de Kuiper, el «nido» de los cometas de corto periodo, auténticas «bolas de hielo sucio» que,

debido a perturbaciones gravitatorias, abandonan dicha región y se internan en nuestro sistema planetario, girando alrededor del Sol en órbitas muy excéntricas, cuyo periodo es inferior a los doscientos años. Podemos considerar el cinturón de Kuiper como territorio inexplorado. Hasta la fecha, solo un ingenio espacial, la sonda estadounidense New Horizons, ha comenzado a internarse en esta región, con el propósito de obtener datos sobre los cuerpos que la pueblan, conocidos técnicamente como KBO (siglas en inglés de «objetos del cinturón de Kuiper»). Otras naves robóticas que se encuentran en lugares más distantes del espacio, como las sondas Pioneer X y XI y las Voyager 1 y 2, abandonaron el plano de la eclíptica antes de alcanzar esta región.

Si millones de estrellas están emitiendo iones al espacio, lo cual es una certeza indudable, entonces no puede existir el vacío absoluto en la galaxia.

S.L. THORNDIKE

El campo de influencia del Sol

Nuestro sistema planetario, como se aprecia en la figura 1, está inmerso en la *heliosfera*, un campo de influencia generado por el viento solar, es decir, el conjunto de partículas que se originan en la parte más externa del Sol, llamada corona, y que escapan de nuestra estrella a velocidades comprendidas entre los 300 y los 800 km/s.

A una distancia de entre 75 y 90 UA, y debido a la interacción con el medio interestelar, el viento solar aminora hasta alcanzar velocidades subsónicas con relación al Sol (por debajo de los 100 km/s), constituyendo el llamado *choque de terminación* (figuras 1 y 2), una zona del espacio donde el campo magnético experimenta, entre otros efectos, una compresión y aumento de su temperatura. Más allá del choque de terminación, a una distancia de entre 80 y 100 UA, se extiende la *heliocapa*, una zona en la que el viento solar continúa su deceleración y compresión, lo que la convierte en un área bastante turbulenta. Algunos modelos apuntan a que la heliocapa tiene una forma similar a la coma

de un cometa, que es la nube que envuelve su núcleo, extendiéndose en sentido opuesto a la trayectoria descrita por el Sol en su órbita alrededor del centro de nuestra galaxia (figura 2).

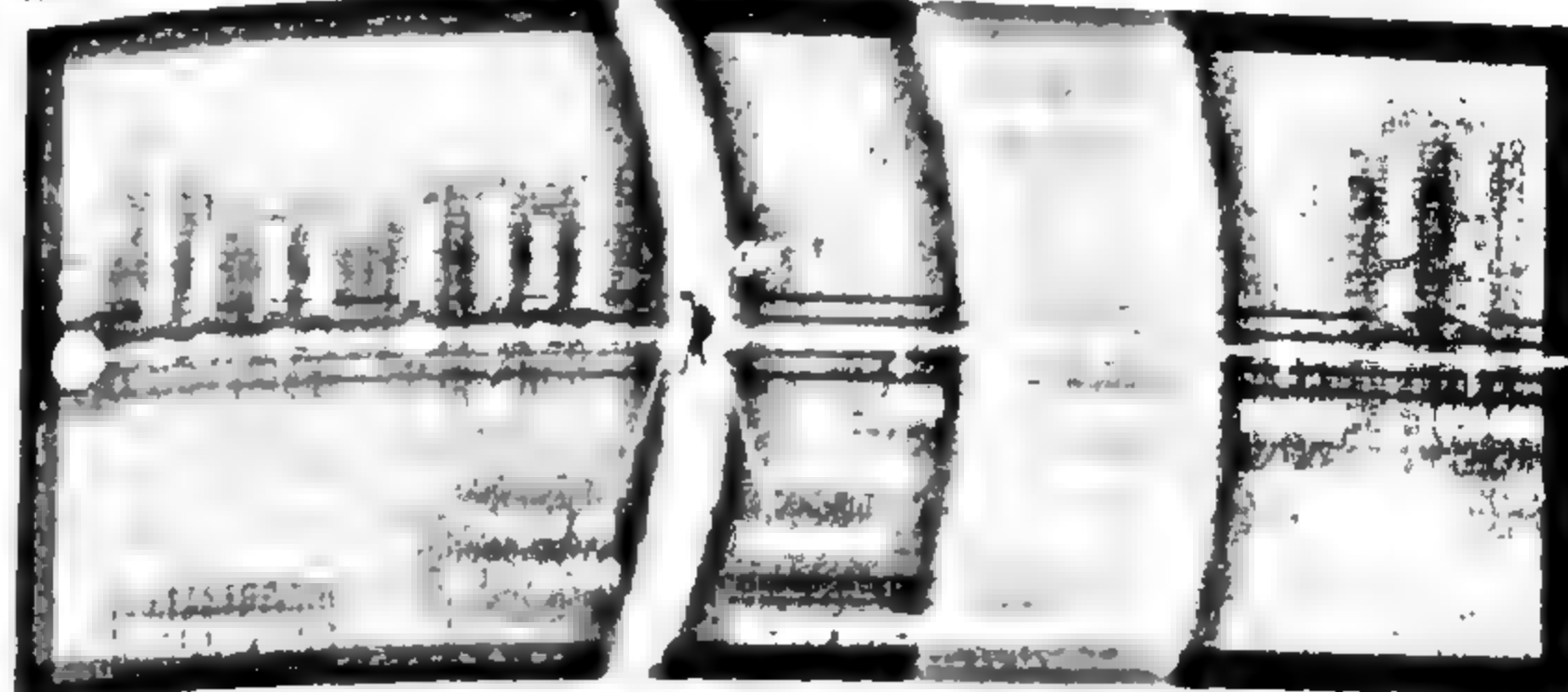
Las lecturas obtenidas por las sondas Voyager 1 y 2 indican que la heliopausa alberga burbujas de unos 160 millones de kilómetros de diámetro, formadas como consecuencia de un fenómeno denominado *reconexión magnética*, que se produce por el impacto del viento solar contra el medio interestelar, en las que la velocidad de las partículas solares se reduce a cero. La *heliopausa* es la frontera final entre la heliosfera y el medio interestelar (figura 2). En ella, las presiones ejercidas por el viento solar y la radiación cósmica entran en equilibrio.

El viaje de la Voyager 1: alcanzando los límites del sistema solar

Lanzadas al espacio por la NASA el 5 de septiembre y el 20 de agosto de 1977 desde la Estación de la Fuerza Aérea en Cabo Cañaveral, las naves Voyager 1 y 2 tenían como misión principal llevar a cabo la exploración de los gigantes gaseosos del sistema solar. Tras pasar cerca de Saturno en noviembre de 1979, la Voyager 1 abandonó el plano de la eclíptica y se dirigió al exterior de nuestro sistema planetario, a una velocidad aproximada de 3,5 UA por año (casi 60 000 km/h). Por su parte, la Voyager 2 continuó su periplo hasta aproximarse a Neptuno en agosto de 1989, abandonando posteriormente el plano de la eclíptica.

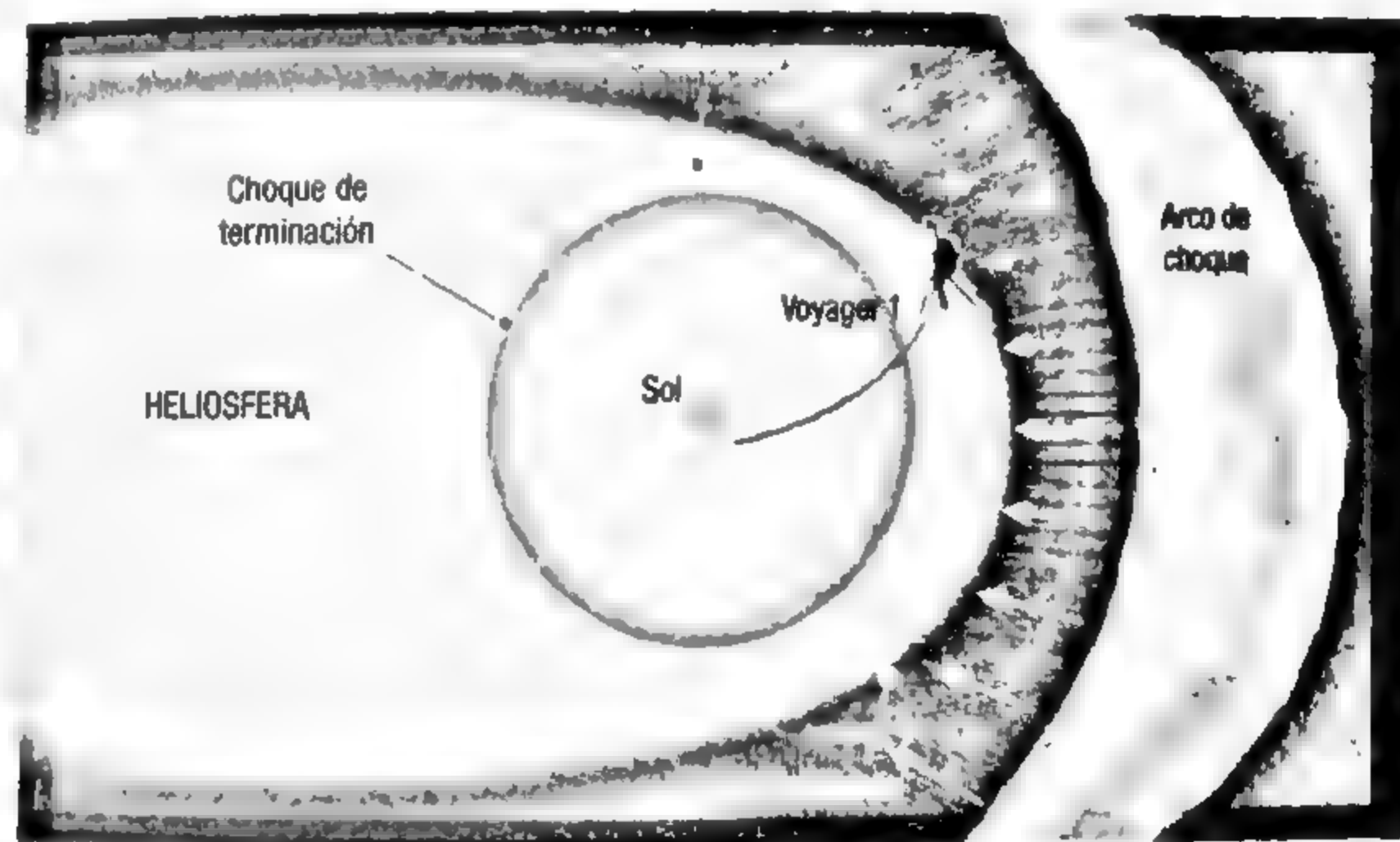
La misión Voyager 1, tras abandonar el plano de la eclíptica en 1989, fue rebautizada con el nombre técnico VIM (siglas en inglés de «misión interestelar Voyager»). A partir de entonces, la nave retorna a la Tierra datos sobre la radiación solar y cósmica. Entre los años 2009 y 2012, la sonda Voyager 1 transmitió una serie de datos a la Tierra que evidenciaban que la nave se encontraba próxima a atravesar la heliopausa, la frontera que limita la heliosfera y el medio interestelar. Sus sensores detectaron un aumento significativo y constante de radiación cósmica, lo que sugería que se estaba aproximando a ella. A partir de los datos recibidos, los científicos de la NASA de-

FIG. 1



Elementos y distancias en el sistema solar. En el esquema se indica la posición de la nave Voyager 1 en el año 2012, a punto de atravesar la heliopausa e internarse en el espacio interestelar.

FIG. 2



Estructura de la heliosfera y situación de la nave Voyager 1. El arco de choque, señalado a la derecha de la imagen, es la superficie en la que el medio interestelar choca con la heliosfera.

terminaron que la nave traspasó la heliopausa el 12 de agosto de 2012, después de treinta y cinco años de viaje. En ese momento se encontraba a una distancia de la Tierra de 121 UA,

literalmente fuera del sistema solar, hallándose actualmente en el medio interestelar (en la imagen superior de la página 61 puede verse una recreación de su aspecto y situación).

La nave Voyager 1 ha llegado donde ningún ingenio espacial había llegado nunca antes. Sin embargo, sus capacidades para el estudio de este nuevo entorno son bastante limitadas. Desde 2007, sus instrumentos están siendo paulatinamente desconectados al objeto de ahorrar energía, que es obtenida a partir de tres generadores térmicos de radioisótopos, empleando como fuente unas pequeñas esferas de plutonio-238 que producían, inicialmente y en su conjunto, una potencia de 420 W. Entre 2017 y 2018 finalizarán sus operaciones giroscópicas, por lo que la nave no tendrá capacidad para corregir su orientación. En 2020, sus instrumentos científicos serán apagados. A partir de 2030, la nave carecerá de energía suficiente, y sus transmisiones cesarán definitivamente.

Con todos los instrumentos desconectados, la Voyager 1 continuará navegando en perpetuo silencio por el espacio, llegando a la nube de Oort dentro de aproximadamente tres siglos e invirtiendo treinta mil años en atravesarla. Su viaje llevará a la sonda a pasar a 1,6 UA de distancia de la estrella Gliese 445, situada en la constelación de Camelopardalis (la Jirafa), un acontecimiento que tendrá lugar dentro de unos cuarenta mil años.

LOS MISTERIOS DEL MEDIO INTERESTELAR

Muy poco se sabe aún de las características que reúne el espacio exterior más allá de la heliosfera. Los datos obtenidos hasta ahora se han adquirido mediante observaciones en el ámbito de la espectroscopia y gracias a misiones espaciales como Voyager 1 e IBEX (acrónimo, en inglés, de «explorador de la frontera interestelar»). Tales datos apuntan a que esta región se encuentra integrada por varias fases, en función del estado, la temperatura y la densidad de la materia.

En cuanto al estado de la materia presente en el medio interestelar, esta puede encontrarse en forma iónica, atómica

o molecular. En todas sus fases, el medio interestelar es muy tenue en comparación con los patrones terrestres. En sus regiones más frías y densas, la materia se encuentra sobre todo en forma molecular, con densidades que se sitúan en torno a un millón de moléculas por centímetro cúbico. Por el contrario, en las regiones calientes y difusas, la materia se presenta principalmente en forma ionizada, con densidades del orden de 10^{-4} iones por centímetro cúbico. Como valor comparativo, podemos citar la densidad de moléculas de nuestra atmósfera al nivel del mar, que es de diez trillones (10^{19}) de moléculas por centímetro cúbico.

El medio interestelar está compuesto principalmente de gas en diversas formas, que representa hasta un 99% del total, correspondiendo el 1% restante a polvo, formado por partículas de unos 100 nm de diámetro (1 nm = 0,001 μ m = 0,000001 mm), y es capaz de absorber la radiación ultravioleta.

En lo que respecta a la proporción de los diferentes tipos de átomos, el principal elemento que se halla presente en el medio interestelar es el hidrógeno (91%), seguido del helio (8,9%) y otros elementos más pesados, considerados metales en el ámbito de la astronomía (0,1%). En términos de masa, el medio interestelar está compuesto de hidrógeno en un 70%, seguido del helio en un 28% y de elementos más pesados en un 1,5%. Tanto el hidrógeno como el helio son productos de la llamada *nucleosíntesis primordial*, la formación de los primeros elementos químicos que tuvo lugar en los minutos que siguieron al Big Bang, la gran explosión que dio origen al espacio y al tiempo, mientras que los elementos más pesados son el resultado de los procesos de la evolución estelar.

El medio interestelar está sometido a un continuo bombardeo de partículas de radiación emitidas por el Sol (las cuales abandonan muy lentamente la heliosfera) y por otras estrellas situadas en la Vía Láctea.

Parece razonable [...] pensar que la mayor parte de la masa del universo se encuentra no en sistemas solares o nebulosas, sino en el espacio «vacío».

KRISTIAN BIRKELAND

Algunos científicos piensan que más allá de la heliosfera existen otras dos fronteras, a las que han dado los nombres de muro de hidrógeno y arco de choque. La primera se ubicaría a continuación de la heliosfera, entre esta y el arco de choque, y estaría constituida por partículas interestelares que habrían interactuado con la heliopausa. El arco de choque estaría localizado a unas 230 UA, y sería una región turbulenta generada por la colisión del medio interestelar con la onda de choque generada por las partículas procedentes del Sol. Se trata de regiones que han podido observarse alrededor de otras estrellas, pero cuya existencia en nuestro sistema solar aún no ha podido ser verificada dados los escasos —y a veces contradictorios— datos obtenidos por misiones espaciales como las Voyager, IBEX, Cassini y Ulysses.

Los científicos estiman que a una distancia de entre 50 000 y 200 000 UA (entre 0,8 y 3,2 años-luz), existe una región poblada por pequeños cuerpos helados, denominada nube de Oort en honor al astrónomo holandés Jan Oort, quien predijo su existencia. Aunque su presencia aún no ha podido ser corroborada mediante observaciones directas, los astrónomos creen que esta región se encuentra integrada, en realidad, por dos nubes, una en forma de disco, llamada nube interior de Oort (también conocida como nube de Hills), y otra de morfología esférica, denominada nube exterior de Oort. Esta última contendría tanto a la primera como a nuestro propio sistema solar, que estaría situado en su centro. Los estudios realizados a lo largo de los años apuntan a que la nube de Oort pudo haberse conformado en distancias más próximas al Sol, sufriendo una dispersión debido a los efectos gravitatorios provocados por los planetas gaseosos en las etapas iniciales de formación del sistema solar. Se cree que esta nube está formada por multitud de cuerpos helados similares a los hallados en el cinturón de Kuiper. Algunos de ellos sufren perturbaciones en sus órbitas como consecuencia de la intensa actividad solar generada por la estrella Próxima Centauri. Como consecuencia, estos cuerpos experimentan cambios en su trayectoria, internándose en nuestro sistema planetario y convirtiéndose en cometas de largo periodo, con órbitas muy excéntricas, que tardan más de doscientos años en completar una vuelta alrededor de nuestro Sol.

LA BASE DE LA VIDA, PRESENTE EN EL MEDIO INTERESTELAR

En septiembre de 2012, científicos de la NASA informaron de que un tipo de compuestos llamados hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH, por sus siglas en inglés) experimentan transformaciones en el medio interestelar mediante procesos como la hidrogenación (exposición al hidrógeno), oxigenación (exposición al oxígeno) e hidroxilación (exposición al hidroxilo, un radical formado por un átomo de oxígeno y uno de hidrógeno), dando como resultado otros compuestos orgánicos más complejos. En palabras de los científicos de la Agencia Espacial Estadounidense, estas transformaciones pueden considerarse un paso hacia la formación de aminoácidos y nucleótidos, la materia prima de las proteínas y el ADN, respectivamente.

Escrutando el firmamento en busca de PAH

Dos años después de aquel anuncio, la NASA presentó una base de datos con el propósito de realizar un escrutinio de los PAH presentes en el universo conocido. Según los científicos, cabe la posibilidad de que más de un 20 % del carbono hallado en el espacio se encuentre vinculado a los hidrocarburos policíclicos aromáticos. Los estudios realizados apuntan a que los PAH pudieron formarse poco después del Big Bang, y se encuentran ampliamente distribuidos en el universo.



Descubrimientos en torno a estrellas jóvenes

En abril de 2015, astrónomos del Observatorio Europeo Austral (ESO) anunciaron el hallazgo de moléculas orgánicas complejas en un disco protoplanetario alrededor de una estrella joven, denominada técnicamente MWC 480. Este descubrimiento ratifica el hecho de que las condiciones que dieron lugar a la aparición de la vida en la Tierra no son exclusivas de nuestro sistema solar.

Impresión artística del disco protoplanetario formado alrededor de la estrella joven MWC 480, en el que han sido halladas moléculas orgánicas complejas.

UNA EXPEDICIÓN A LO DESCONOCIDO

Desde agosto de 2012, la sonda espacial Voyager 1 de la NASA, cuyo aspecto se muestra en la imagen superior de la página 61, se encuentra navegando en el medio interestelar. Pero la nave, que despegó de la Tierra en el año 1977, se encuentra en la recta final de su misión, por lo que sus posibilidades de estudiar esta región del espacio son cada vez menores. Por este motivo, científicos e ingenieros están urgiendo a la comunidad espacial a poner en marcha iniciativas para el envío de ingenios robóticos al medio interestelar (véase la imagen inferior derecha de la página 61). Se trata de un paso previo y necesario en el largo camino que el ser humano debe recorrer para, en un futuro no demasiado lejano, materializar su presencia más allá de nuestro sistema solar.

Siguiendo la estela de misiones como las Pioneer, Voyager y New Horizons, un grupo de especialistas estadounidenses, encabezados por científicos del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, el Instituto de Tecnología de California (Caltech) y el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL, por sus siglas en inglés), están dando forma a una propuesta para el envío de la primera nave espacial al medio interestelar. El instrumento comenzaría a realizar su misión en la década de 2050.

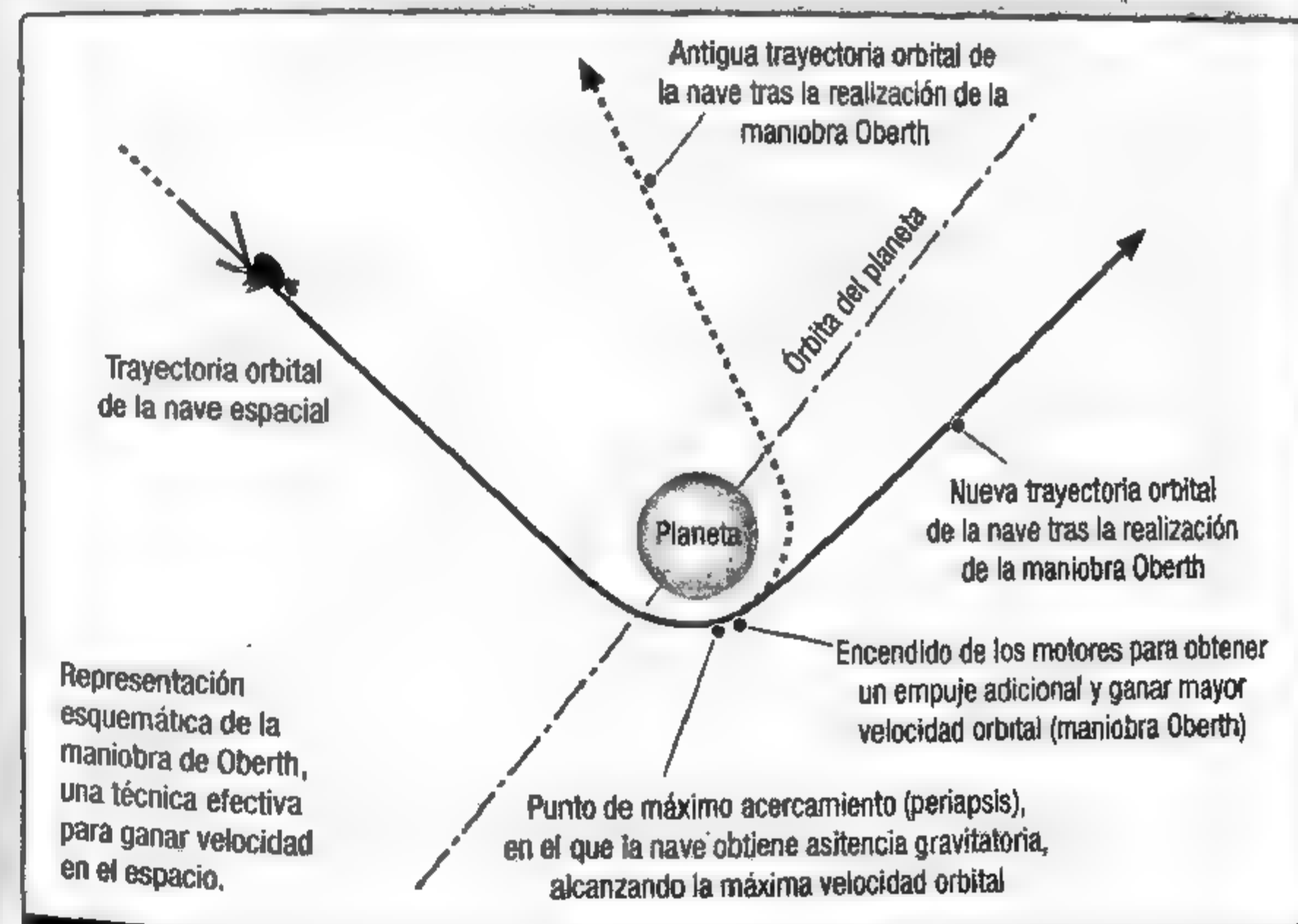
La propuesta contempla el lanzamiento de una nave con una masa aproximada de 450 kg a bordo de una versión de gran capacidad del SLS (siglas en inglés de «sistema de lanzamiento espacial»), uno de los cohetes más potentes jamás construido. La nave precisaría de asistencia gravitatoria, una técnica en la que se aproxima a un planeta para aprovechar su campo gravitatorio y ganar velocidad, y la duración de su viaje hasta llegar al medio interestelar variaría en función de si esta asistencia se realiza o no en combinación con una acción propulsora (encendido del motor de la nave), una técnica denominada maniobra Oberth. Así, con una asistencia gravitatoria simple, empleando para ello la atracción de Júpiter y el Sol, la nave alcanzaría una velocidad de 26 km/s, y tardaría 39 años en cubrir la distancia hasta el medio interestelar. Si la misión realizase una maniobra Oberth

LA MANIOBRA OBERTH

Denominada así en honor al científico alemán Hermann Oberth, que la describió por primera vez en 1927, consiste en emplear el campo de gravedad de un cuerpo celeste en combinación con una acción propulsora, consiguiendo una ganancia de energía cinética.

Una técnica efectiva para ganar velocidad en el espacio

En física, el campo de gravedad generado por un cuerpo celeste es considerado un «pozo gravitatorio». Cualquier sonda que se aproxime a él experimentará una aceleración directamente proporcional a su proximidad al cuerpo celeste. Una excesiva aproximación provocará el impacto de la sonda sobre el astro, pero un acercamiento controlado proporcionará una ganancia de energía cinética, es decir, mayor velocidad. Este fenómeno se denomina asistencia gravitatoria, y se emplea en misiones espaciales de exploración planetaria para acortar el tiempo de viaje y realizar correcciones orbitales. La maniobra Oberth introduce, además, la acción propulsora. Una vez adquirida la máxima velocidad dentro del pozo gravitatorio, el encendido del motor de la sonda imprimirá una energía cinética adicional. En consecuencia, la velocidad alcanzada por la nave será mayor que si el encendido se realizase fuera del campo gravitatorio del cuerpo celeste, un efecto conocido como efecto Oberth, que es mayor en la *periapsis*, el punto de máximo acercamiento de una sonda con respecto al cuerpo celeste sobre el que realiza la aproximación.

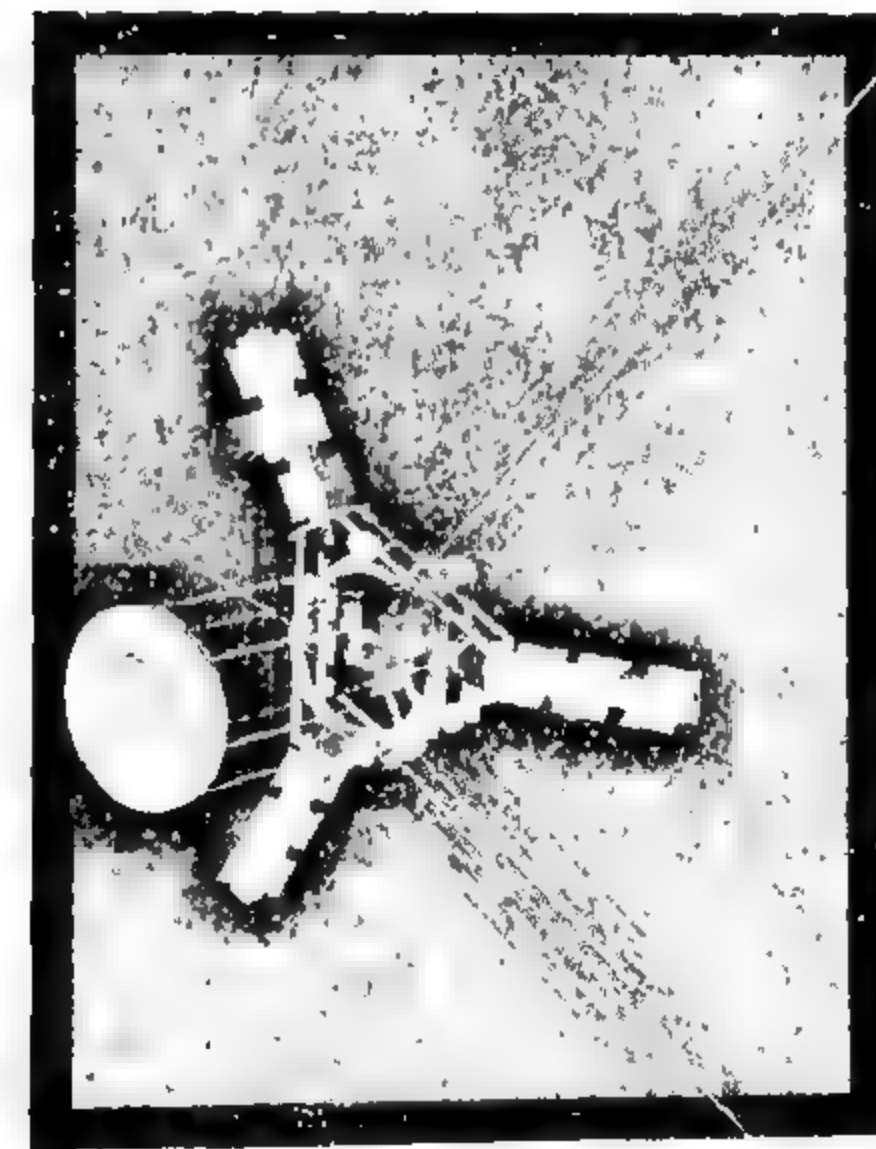


durante una única asistencia gravitatoria de Júpiter, la velocidad resultante sería de 30 km/s, reduciendo el tiempo de viaje hasta los 29 años.

Existe una distancia en el espacio con respecto al Sol a partir de la cual los paneles solares no producen el rendimiento necesario para alimentar los instrumentos científicos de una nave espacial. Por este motivo, sondas como las Pioneer, Voyager y New Horizons emplean generadores térmicos de radioisótopos, cuya fuente de energía es el plutonio-238. Esta tecnología ha demostrado ser muy fiable y versátil en misiones robóticas de larga duración enviadas a las profundidades del espacio. Cuatro décadas después de su lanzamiento, los generadores de radioisótopos de las Voyager aún siguen proporcionando energía. Inicialmente, estos dispositivos suministraban una potencia de 450 W, cifra que ha ido decreciendo hasta situarse actualmente en 170 W. Sin embargo, la disponibilidad de este isótopo es muy limitada. El último ingenio espacial en emplearlo como fuente de energía es el Laboratorio Científico de Marte, Curiosity, que actualmente explora la región del cráter Gale. Su sucesor, un vehículo todoterreno de prestaciones análogas, también usará el plutonio-238 para producir electricidad, siendo, por el momento, el último ingenio que se servirá de este isótopo como fuente energética.

Dadas las características de la misión, que persigue recorrer una distancia de 200 UA en menos de treinta años, la carga útil de la nave contaría con limitaciones significativas, siendo las principales su masa y su potencia, que no podrán exceder los 50 kg y los 50 W, respectivamente.

La propuesta citada para el lanzamiento de la primera nave interestelar contempla la incorporación de un equipo científico integrado por cámaras de luz visible, para tomar imágenes durante los pasos cercanos a cuerpos celestes y realizar actividades de astrometría; una cámara de infrarrojos, para determinar la distribución tridimensional del polvo en el medio interestelar, y sensores y otros instrumentos ópticos, para explorar el medio y su interacción con la heliosfera. A través de su equipamiento, la sonda obtendría lecturas a partir de las cuales se podrían conocer las características del medio espacial entre las diez y las



Arriba, impresión artística de la nave Voyager 1 en el medio interestelar, con la Vía Láctea de fondo. Abajo a la izquierda, fotografía de la atmósfera de Júpiter compuesta a partir de tres imágenes captadas por la nave Voyager 1 en 1979. A la derecha, concepto de sonda espacial para la exploración del medio interestelar.

doscientas unidades astronómicas de distancia con respecto al Sol.

En su camino, la sonda tendría oportunidad de realizar, en la década de 2030, una aproximación al planeta enano Quaoar, un cuerpo celeste situado a 45 UA, el cual, de acuerdo con las observaciones realizadas, se encuentra en las últimas etapas del proceso de pérdida de su atmósfera, en la que predomina el metano. Se estima que en torno a 2050 la nave alcanzaría los límites de la heliosfera y comenzaría a adentrarse en el medio interestelar, proporcionando las primeras imágenes externas de la heliosfera y los primeros datos del disco de polvo circunsolar, antes de continuar con su largo viaje hacia lo desconocido.

CAPÍTULO 4

¿Cómo llegar a las estrellas?

Científicos e ingenieros ya se encuentran trabajando en el desarrollo de métodos que permitan, en un futuro no muy lejano, realizar viajes a otros sistemas solares. Estas iniciativas intentan dar una solución al principal de los problemas que dificultan esta ambiciosa empresa: la propulsión.

Desde la perspectiva humana, uno de los principales rasgos definitorios del universo es su inmensidad y las enormes distancias que separan los cuerpos celestes. Nuestro sistema solar se encuentra ubicado en la parte exterior de la Vía Láctea, a unos veinticinco mil años-luz del centro de la galaxia, concretamente en una región conocida como brazo de Orión (figura 1). Esto significa que si tuviéramos la capacidad de viajar a la velocidad de la luz, invertiríamos veinticinco mil años en alcanzar el centro galáctico, un plazo de tiempo excesivo en relación con la longevidad humana.

Dado que las leyes naturales nos impiden alcanzar esa velocidad, una expedición de tal magnitud tardaría miles de millones de años en lograrse con los sistemas de propulsión actuales, convirtiendo la idea en algo completamente descabellado. No obstante, científicos e ingenieros están trabajando en conceptos que, aunque no persiguen alcanzar la velocidad de la luz por ser físicamente imposible, sí podrían lograr fracciones significativas de la misma, lo que acortaría sensiblemente los tiempos, haciendo de los viajes a los sistemas solares más cercanos una empresa factible, dentro de ciertos límites.

VEHÍCULOS TITÁNICOS PARA MISIONES EXCEPCIONALES

Los primeros estudios en este sentido no son recientes. Ya en la década de 1970 surgieron propuestas en Estados Unidos y en Gran Bretaña para la construcción de naves espaciales con el propósito de realizar expediciones humanas a otros sistemas planetarios. Motores de fusión nuclear y estatorreactores son algunos de los conceptos que se han barajado en algunos de estos proyectos, cuyo estudio no ha abandonado aún el ámbito de lo teórico, principalmente debido a las limitaciones tecnológicas actuales.

El Proyecto Orión

Esta iniciativa, aunque comparte denominación con el Programa Orión de la NASA destinado a la exploración humana de otros

cuerpos celestes del sistema solar, no guarda relación alguna con él. El proyecto surgió en el año 1958 en Estados Unidos de la mano de los físicos Ted Taylor, de la compañía General Atomics, y Freeman Dyson, de la Universidad de Princeton. Taylor solicitó la colaboración de Dyson en la fase inicial del proyecto, que tenía

en cuenta los estudios previos relacionados en el campo de la propulsión nuclear, surgidos en 1946 en la Unión Soviética y en 1947 en Estados Unidos.

El sistema de propulsión en el que se basaba el Proyecto Orión implicaba la detonación de bombas nucleares de forma secuencial. En cada detonación, el vehículo espacial ganaría un impulso adicional, dado que el plasma producido en las explosiones ejercería presión sobre la superficie de una inmensa placa de empuje instalada en la popa de la nave. Consecuentemente, la velocidad final alcanzada por el ingenio habría sido notablemente alta. Sin embargo, esta iniciativa contaba con importantes inconvenien-

Yo mismo lo he sentido. El brillo de las armas nucleares. Es irresistible si te acercas a ellas como científico.

FREEMAN DYSON

FIG. 1



Posición del Sol en la Vía Láctea. Nuestra estrella se ubica en el llamado brazo de Orión, a unos 25 000 años-luz del centro de la galaxia.

tes. El primero de ellos era el excesivo número de bombas necesarias para su viabilidad (entre ochocientas y trescientas mil), seguido de su tasa de detonaciones, de una por segundo. En tercer lugar estaba la masa del cohete. Su envergadura habría hecho inevitable su construcción por fases en órbita terrestre, una técnica que se viene practicando desde la década de 1970 y que ha permitido el ensamblaje de vehículos de gran tamaño, como el complejo ruso Mir y la Estación Espacial Internacional.

En el año 1959, el equipo responsable del proyecto logró construir y lanzar un modelo a escala, con una longitud de 2,1 m y propulsado mediante detonaciones no nucleares. Apodado Hot Rod («barra caliente»), el cohete sobrevivió a cinco explosiones sucesivas, ganando velocidad en cada una de ellas, tras lo cual descendió en paracaídas. La prueba demostró que el cohete Orión era factible, al menos en lo que se refería al aspecto técnico. Sin embargo, el proyecto fue cancelado debido al creciente miedo de la sociedad hacia la energía atómica y a la firma, en el año 1963, del Tratado de prohibición parcial de ensayos nucleares, que impedía la realización de experiencias en este ámbito, a

excepción de las efectuadas en cotas subterráneas. Hoy en día el modelo a escala del cohete Orión forma parte de las colecciones del Museo Nacional del Aire y del Espacio, perteneciente al Instituto Smithsonian.

El Proyecto Daedalus

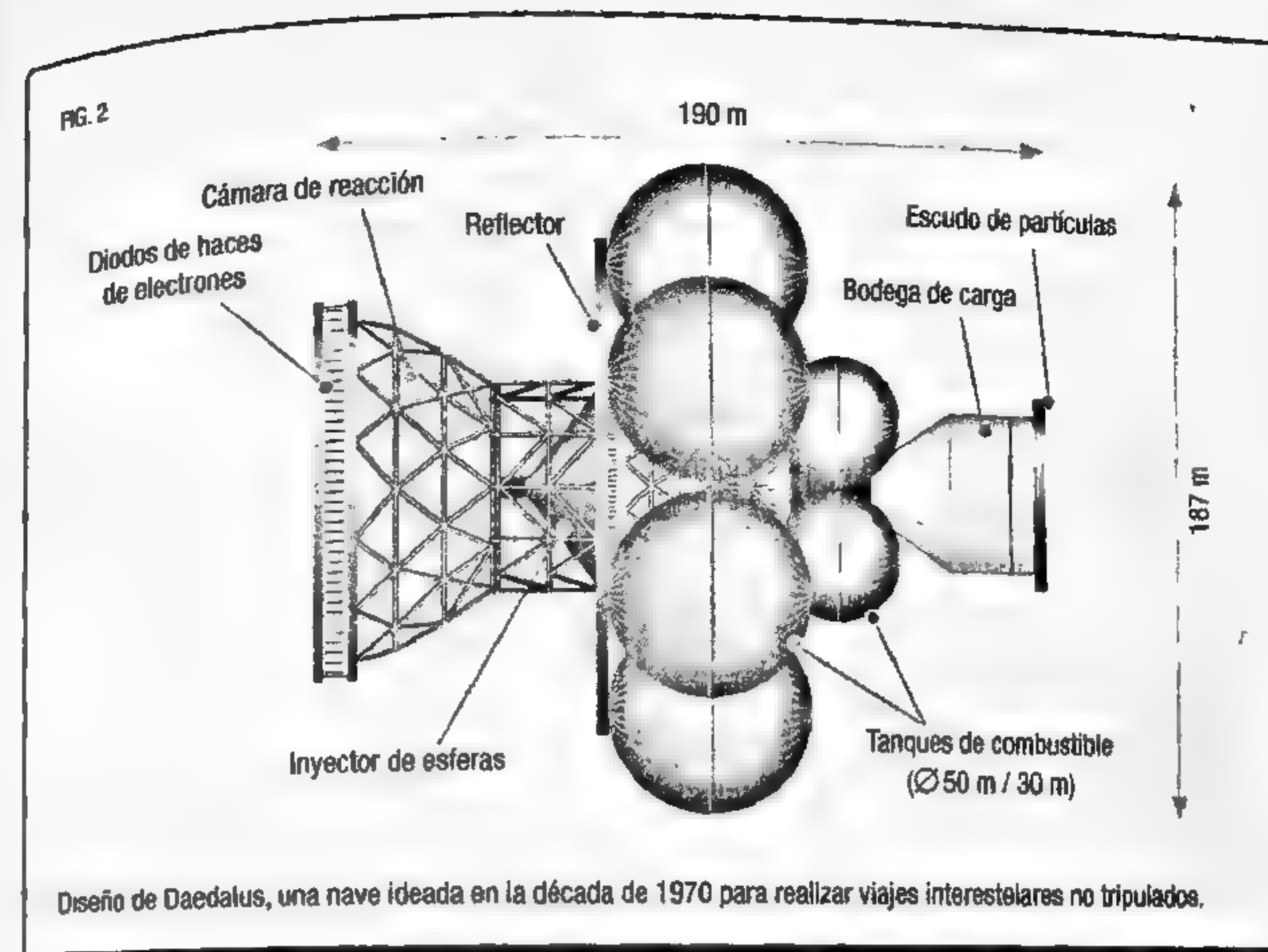
Al otro lado del Atlántico, la Sociedad Británica Interplanetaria (BIS, por sus siglas en inglés) también se mostró interesada en sistemas de propulsión avanzada y en la posibilidad de emprender expediciones más allá de nuestro sistema solar.

Abordada por un equipo integrado por trece científicos e ingenieros, y liderada por Alan Bond, director de la compañía Reaction Engines Limited, la iniciativa de la BIS recibió el nombre de Daedalus, en honor a Dédalo, constructor y arquitecto griego creador del Laberinto de Minos, quien fabricó alas para él y para su hijo Ícaro con las que escaparse de su presidio. Entre los años 1973 y 1978, la Sociedad Británica invirtió sus recursos en el diseño de un vehículo espacial que hiciera factible una expedición a Barnard, una estrella situada a 5,9 años-luz de nuestro sistema solar, en un marco temporal de cincuenta años. La iniciativa tenía en cuenta el factor flexibilidad, con el propósito de poder realizar expediciones a otras estrellas cercanas.

Este proyecto debía cumplir los siguientes objetivos: la utilización de tecnología actual (o disponible en un futuro cercano) para la construcción del vehículo espacial, que este ejecutase su misión en el plazo de una vida humana, y que su diseño permitiera realizar otras misiones a diferentes estrellas.

El diseño del Daedalus, que se puede ver en la figura 2, contemplaba la construcción de una nave cuya masa total se situaba en torno a las cincuenta mil toneladas, de las cuales 450 correspondían a instrumentación científica integrada por dieciocho sondas destinadas a la exploración planetaria.

A diferencia del Proyecto Orión estadounidense, el Daedalus basaba su sistema de propulsión en la fusión nuclear, una técnica que, si bien aún no ha sido lograda por limitaciones tecnológicas,



cas, se postula como el método definitivo para la producción de energía en el futuro. A diferencia de la técnica de fisión, cuyos residuos son muy contaminantes por ser altamente radiactivos, la de fusión no presenta este problema, dado que la mayoría de los residuos producidos no emiten radiación alguna, y los que sí lo hacen tienen una vida muy corta.

El motor del Daedalus tenía previsto emplear esferas de deuterio y de helio-3, isótopos estables del hidrógeno y del helio, respectivamente. Unos diodos de haces de electrones, ubicados alrededor de la base de la tobera del motor, causarían la ignición de las esferas para producir una alta ganancia energética, a una tasa de 250 detonaciones por segundo, provocando un empuje continuo durante un periodo de 3,8 años, que permitiría alcanzar una velocidad máxima próxima a los 36000 km/s (un 12% de la velocidad de la luz), dando lugar a una fase de crucero estimada de 46 años hasta llegar a las proximidades de la estrella Barnard.

Aunque nunca llegó a ver la luz, los responsables del proyecto consideran al Daedalus como el más avanzado y detallado estudio de ingeniería jamás realizado en el ámbito de los vuelos interestelares. A esta iniciativa le sucedió en septiembre de 2009 el Proyecto Icarus, desarrollado en el marco de la BIS en colaboración con la Tau Zero Foundation, bajo el liderazgo de Richard Obousy. Se trata, en líneas generales, de la continuidad del Proyecto Daedalus, dado que sus objetivos son análogos.

Energía enfocada para internarse en el océano cósmico

Las iniciativas abordadas en páginas anteriores son tan complejas que su puesta en marcha es, por ahora, imposible, aunque técnicamente son viables. Sin embargo, existen proyectos que son factibles con la tecnología disponible, y emplean algo tan común y tan misterioso como la luz.

Las velas solares emplean la radiación solar como fuente propulsora. El Sol emite un flujo continuo de fotones (luz solar) que, al impactar contra una gran superficie constituida de material reflectante, provoca una presión sobre ella, produciéndose un efecto propulsivo (véanse las imágenes de la página 73). Una presión continuada suministra, a una nave espacial dotada de una o varias velas solares, el empuje necesario para realizar en el espacio maniobras como rotación y cambios de orientación, que precisarían de una importante cantidad de combustible si se emplearan sistemas de propulsión convencionales. En misiones lejanas, como por ejemplo a otros sistemas solares, donde la radiación lumínica de nuestro Sol haría poco práctica la utilización de velas solares a partir de una determinada distancia, el flujo de fotones podría ser generado por la emisión de haces de luz concentrada (láser), cuyo efecto sobre las velas sería análogo al producido por la radiación solar.

El concepto de vela solar como sistema de propulsión espacial no es nuevo. En la década de 1970, Carl Sagan, Louis Friedman y Bruce Murray elaboraron las primeras propuestas en las oficinas del Laboratorio de Propulsión a Chorro, en Pasadena, Estados

Unidos. Entre otras, diseñaron una nave dotada de velas solares destinada a la exploración del cometa Halley durante su paso cerca de la Tierra en 1986, aunque nunca llegó a volar. Sin embargo, el concepto de vela solar continuó en estudio, y algunos proyectos abandonaron la mesa de diseño para convertirse en realidad. Tal es el caso de la japonesa IKAROS (de 196 m² de superficie), lanzada en 2010, y las estadounidenses Nanosail-D (de 9,3 m²) y LightSail 1 (de 32 m²), lanzadas en 2008 y 2015, respectivamente. La última fue un proyecto de The Planetary Society (Sociedad Planetaria), entidad fundada por Sagan, Friedman y Murray en 1980, lo que la convirtió en la primera iniciativa privada de estas características.

La NASA y la Universidad de California iniciaron en el año 2009 el programa DEEP-IN (acrónimo, en inglés, de «propulsión de energía enfocada para la exploración interestelar»). Esta iniciativa persigue el lanzamiento de naves espaciales a velocidades relativistas (fracciones de la velocidad de la luz) y así acortar sensiblemente las misiones con destino más allá de nuestro sistema solar. Se trata de pequeñas sondas no tripuladas de muy baja masa, llamadas popularmente *wafer sats*, «satélites barquillo», en alusión a la principal característica de estos populares productos alimentarios: su ligereza. En esencia, son nanosondas que no superarán el gramo de peso. A pesar de sus reducidas dimensiones y masa, estarán dotadas de sistemas de comunicación, óptica y sensores diversos. Los ingenieros que trabajan en este proyecto creen que las velocidades que podrán alcanzar estas nanosondas estarán próximas a 0,25 *c* (siendo *c* el símbolo de la velocidad de la luz), es decir, alrededor de 75 000 km/s.

Uno de los principales objetivos de estos ingenios robóticos será probablemente el sistema solar de Próxima Centauri, en el que se ubica un planeta de tamaño similar a la Tierra. Como explicábamos en el segundo capítulo, y abordaremos con mayor detalle en el próximo, este sistema solar se encuentra a tan solo cuatro años-luz de nosotros, por lo que una nanosonda viajando a una velocidad de 0,25 *c* invertiría solamente dieciséis años en llegar hasta él, y los datos obtenidos por ella alcanzarían la Tierra en un plazo de cuatro años. Dadas las características de distancia y tiempo de este proyecto, una sola nave tendría muchas probabilidades de sufrir al-

guna avería grave que truncara completamente la misión. Por este motivo, el DEEP-IN contempla el lanzamiento de un «enjambre» de nanosondas, al objeto de maximizar las probabilidades de éxito.

En abril de 2016, el filántropo ruso Yuri Milner, director del programa Breakthrough Initiatives («iniciativas de progreso»),

La extensión del espacio se convierte literalmente en un análogo del mar abierto. Si el espacio es el océano de mañana, la superficie de la Tierra es su costa.

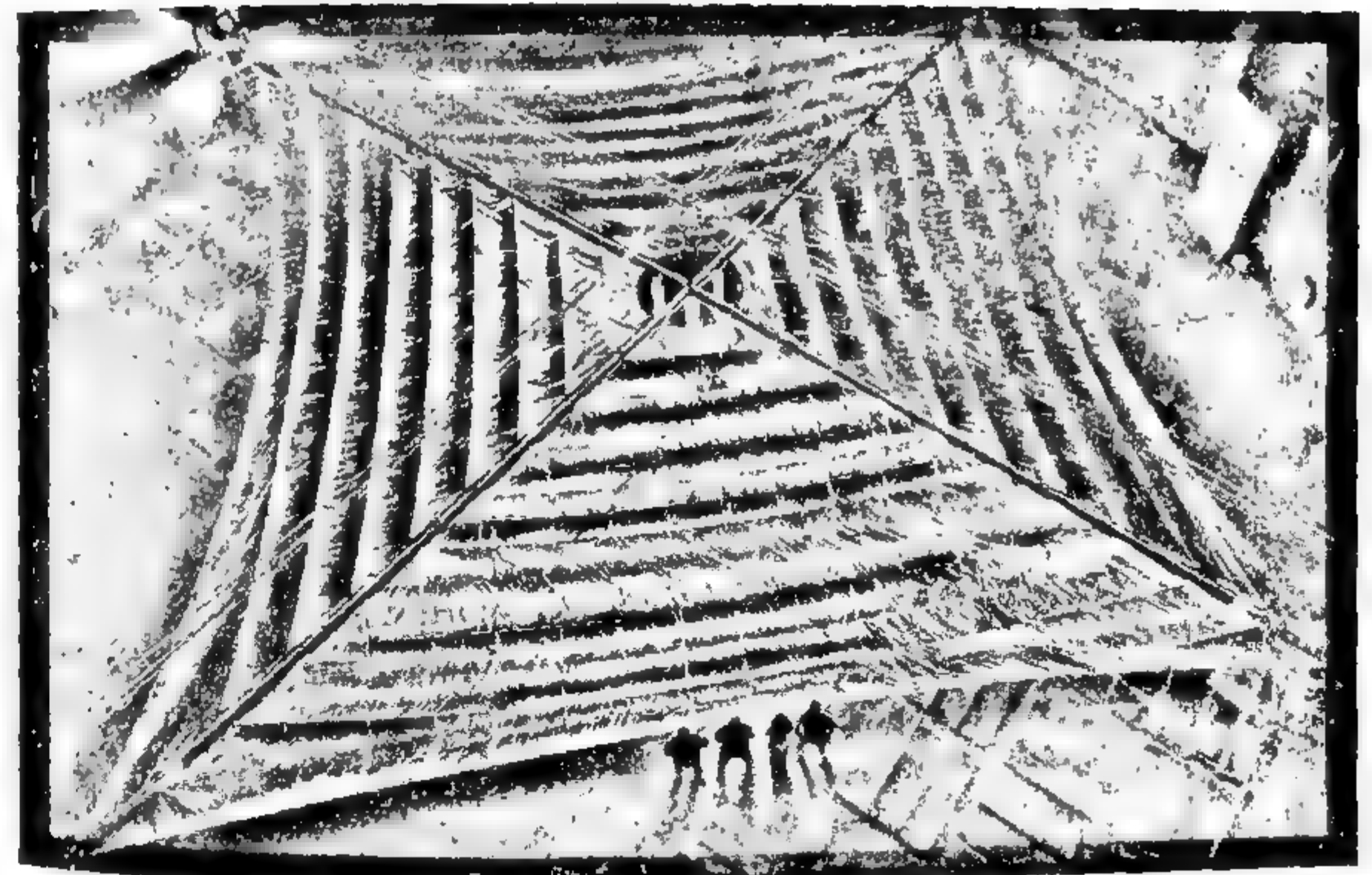
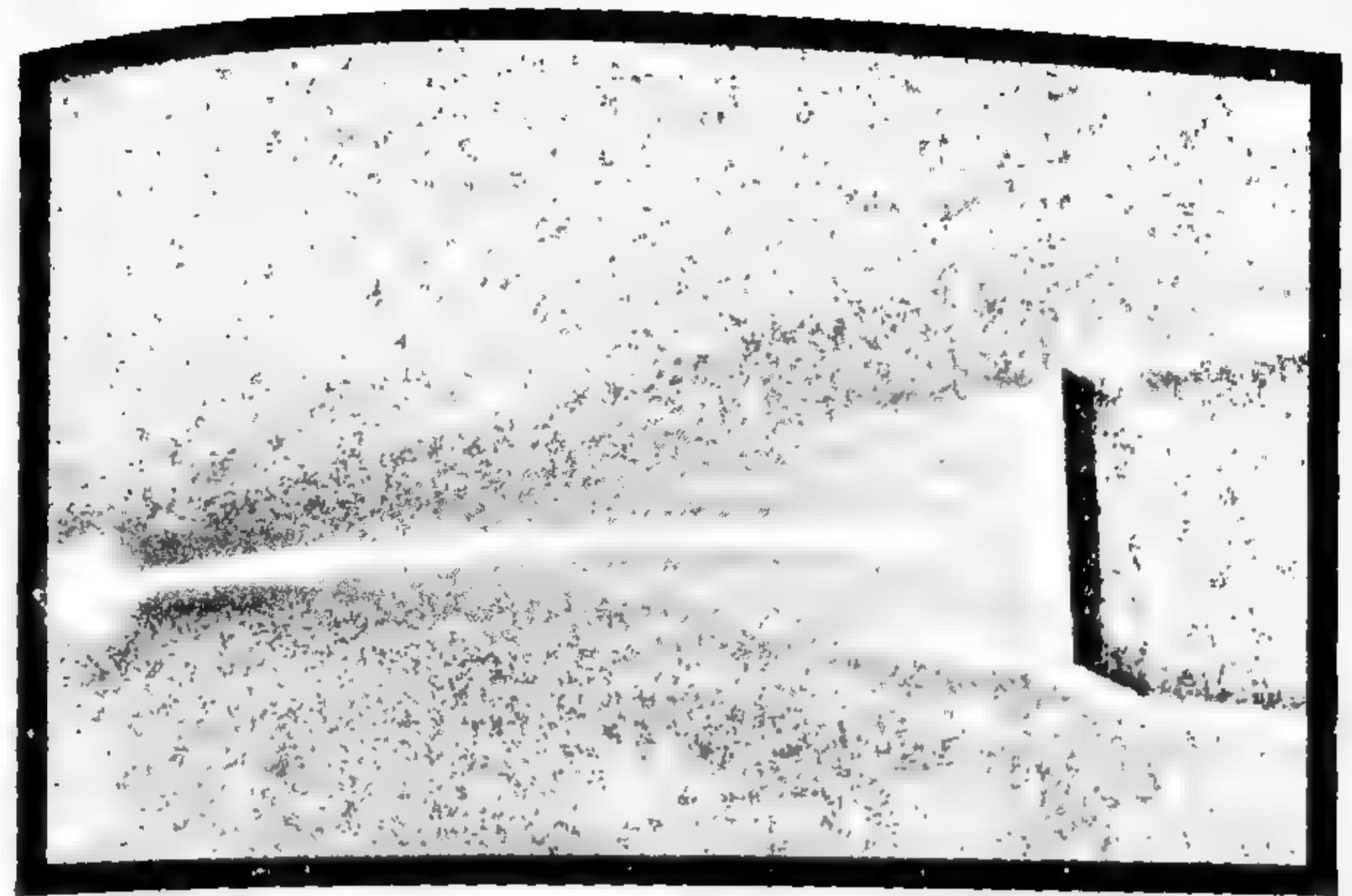
NEIL DEGRASSE TYSON

Starshot está liderado por Pete Worden, antiguo director del Centro de Investigación Ames de la NASA, y su comité consultor está formado por científicos de renombre internacional, como el físico Stephen Hawking y miembros de The Planetary Society.

Propulsión eléctrica

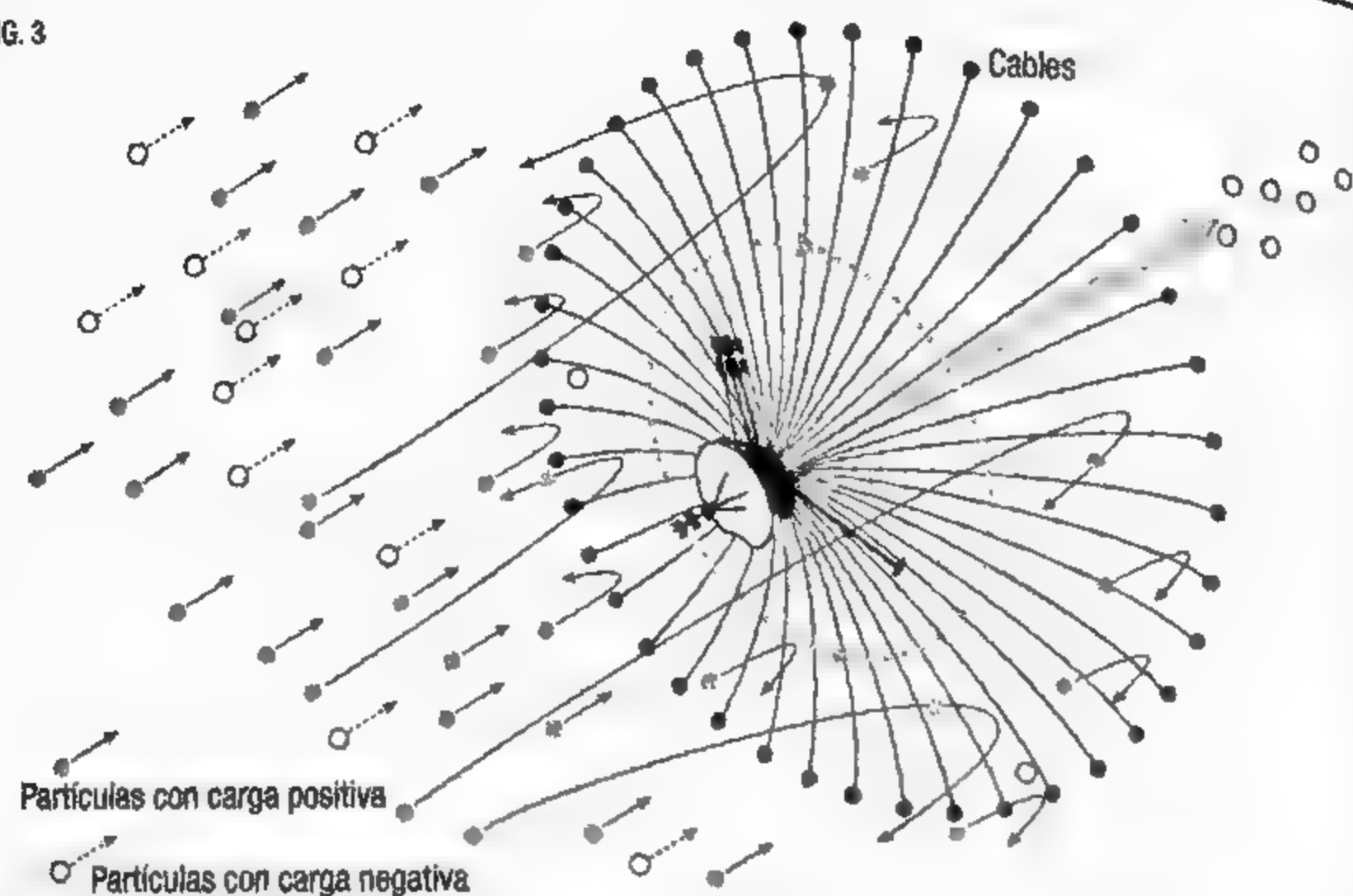
Se trata de un sistema que aún no ha sido probado en el espacio, aunque teóricamente podría ser bastante versátil, especialmente en misiones enviadas a distancias remotas, del orden de 1000 UA.

Este sistema se compone de entre diez y cien cables muy finos, de varios kilómetros de longitud y capaces de conducir la electricidad, que serían desplegados por una nave espacial, la cual se encontraría en rotación continua al objeto de mantener tensos los cables. Un generador de radioisótopos, similar a los empleados en las misiones Voyager, produciría una corriente eléctrica que se propagaría por los cables, creando un campo que se extendería hacia las partículas que conforman el viento solar, cargadas positivamente (figura 3). Al entrar en contacto con estas, se produciría un efecto de repulsión, generándose un



Arriba, concepto de vela propulsada mediante energía enfocada. El impacto de los fotones con la «vela» genera el efecto propulsivo. Abajo, vela solar de 20 m de envergadura, desarrollada por la compañía estadounidense L'Garde.

FIG. 3



Funcionamiento de una vela eléctrica o E-vela. El contacto de las partículas del viento solar con el campo eléctrico producido por el generador de radioisótopos (en el centro de la vela) provoca el desplazamiento de la vela, representado por la flecha recta y gruesa.

empuje. A diferencia de las velas solares, las eléctricas producen un mayor empuje en vuelos con destino al espacio profundo. De probarse su versatilidad, es posible que esta tecnología permita el envío de misiones a distancias próximas a las 100 UA en un plazo de tiempo de tan solo diez años.

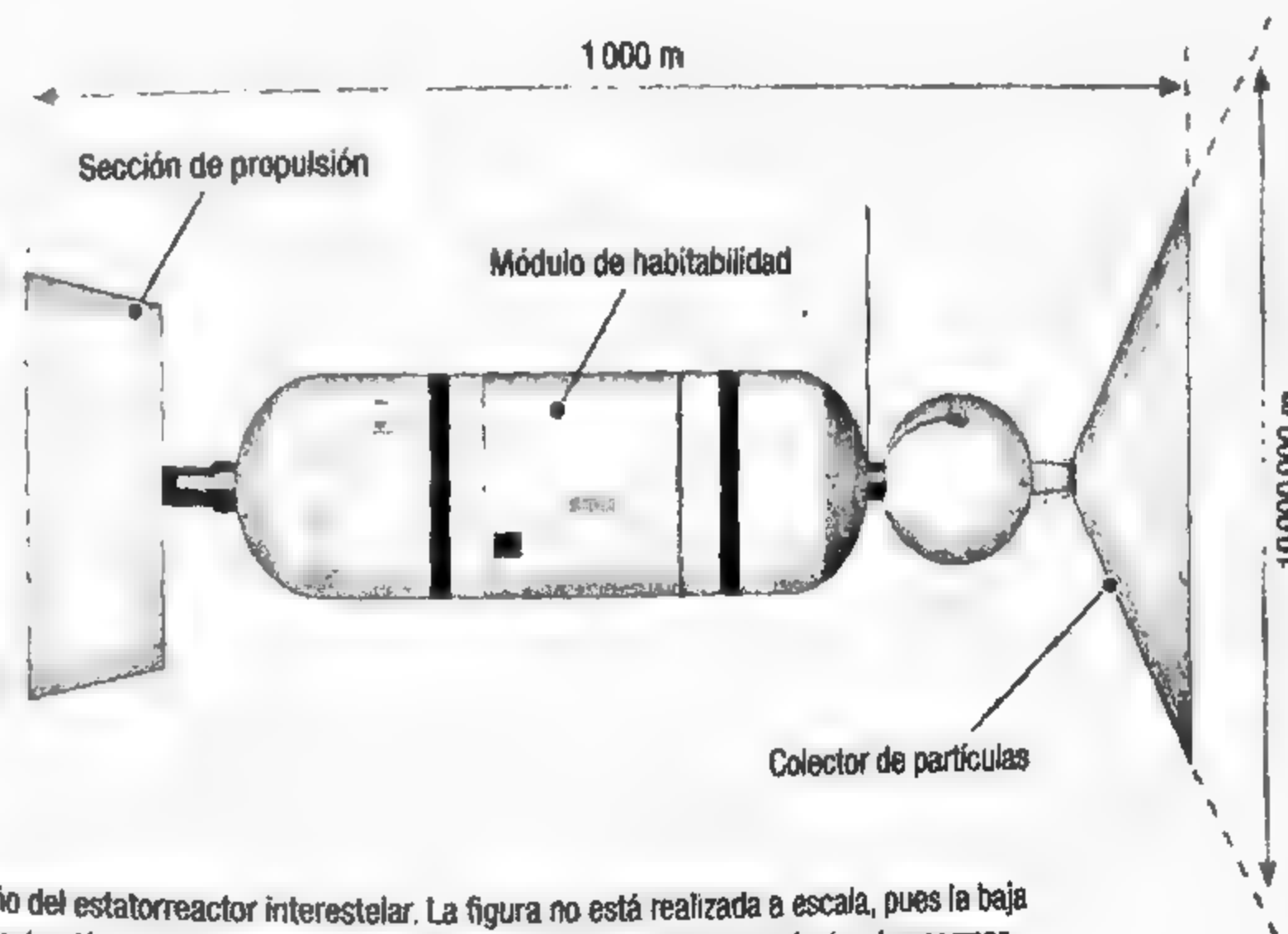
El estatorreactor interestelar

En el año 1960, el físico Robert W. Bussard introdujo un nuevo sistema de propulsión ideado para vuelos espaciales interestelares. Denominado *ramjet* o estatorreactor (figura 4), este método se basa en la utilización de dos instrumentos principales. El primero de ellos es un dispositivo colector de grandes dimensiones, capaz de crear un campo magnético de varios cientos o miles de kilómetros de diámetro con el propósito de recoger el hidróge-

no, cuya concentración en el medio interestelar es muy escasa, y almacenarlo en depósitos para su posterior utilización como combustible. El segundo componente del estatorreactor es un motor diseñado para calentar el hidrógeno con el fin de generar una reacción de fusión. Dado que los procesos de recolección y fusión se realizarían de manera simultánea, la nave experimentaría una aceleración continua.

De acuerdo a los cálculos efectuados por Bussard, una nave espacial de mil toneladas de masa, dotada de un motor cuya eficiencia alcanzase el 100%, y que pudiera obtener combustible en un medio con una densidad de una partícula por cada centímetro cúbico, podría acelerar de manera indefinida con una fuerza de 1 *g* (siendo *g* la fuerza de gravedad de la Tierra). Aunque la velocidad teórica máxima del estatorreactor ideado por Bussard se situaría próxima a la de la luz, la nave se vería obstaculizada, entre otras cosas, por la densidad de la materia interestelar y por

FIG. 4



Diseño del estatorreactor interestelar. La figura no está realizada a escala, pues la baja concentración de hidrógeno en el medio interestelar requiere un colector de enormes dimensiones.

el frenado que provocarían los protones que el vehículo se iría encontrando en su camino.

Aunque el estatorreactor tiene la ventaja de eliminar la necesidad de llevar almacenado combustible, dado que este se obtendría durante el viaje, no podría cumplir con su cometido por debajo del 6% de la velocidad de la luz. Por tanto, sería necesario que la nave espacial estuviera dotada de otro sistema de propulsión que le permitiera alcanzar dicha velocidad para que el estatorreactor pudiera entrar en funcionamiento.

LA DILATACIÓN DEL TIEMPO

El hecho de viajar a velocidades relativistas trae consigo un fenómeno descrito hace cien años por el físico alemán Albert Einstein en su teoría de la relatividad: la dilatación del tiempo, es decir, la diferencia del tiempo transcurrido entre dos eventos medidos por observadores que o bien se mueven el uno con respecto al otro o bien se encuentran situados a distancias diferentes de una o varias masas gravitacionales.

A grandes rasgos, Einstein postulaba que una persona que viajara a velocidades relativistas, experimentaría una ralentización del tiempo con respecto a un observador estático, si bien la percepción del mismo por parte tanto del viajero como del observador seguiría siendo normal. En consecuencia, el tiempo de viaje a tales velocidades será diferente si es medido por el viajero o por el observador. Se trata de un fenómeno que puede advertirse incluso a pequeña escala, en vuelos de larga duración a bordo de la ISS. En las misiones de seis meses, los astronautas participantes envejecen menos que los habitantes de la Tierra, determinándose que la dilatación del tiempo se sitúa en torno a 0,005 segundos en dicho periodo.

Como explicábamos en líneas anteriores, la dilatación temporal es causada tanto por la gravedad como por la velocidad relativa. En el caso de la ISS, el efecto es producto de la velocidad mantenida por el complejo orbital en su órbita alrededor de la Tierra. El hecho de que la estación se encuentre a unos

LOS VIAJEROS TEMPORALES KELLY Y KORNIENKO

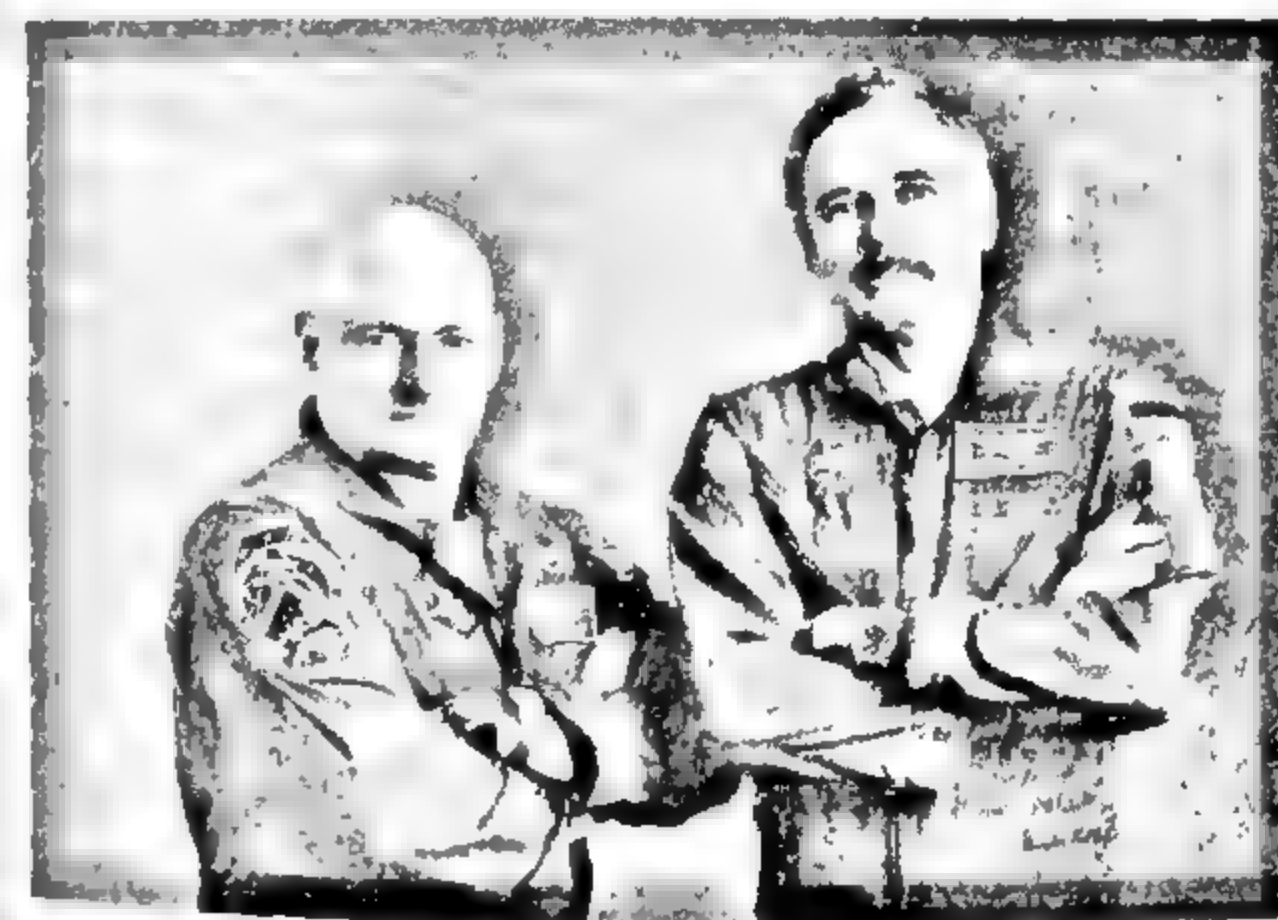
Entre el 15 marzo de 2016 y el 2 de marzo de 2017 se llevó a cabo la primera misión de larga duración a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS). Hasta entonces, las expediciones solían extenderse por espacio de seis meses (unos 180 días). El astronauta estadounidense Scott Kelly y el cosmonauta ruso Mijaíl Kornienko invirtieron 340 días a bordo de la ISS para realizar multitud de experimentos.

La dilatación del tiempo en la misión

A partir de una fórmula matemática relativamente simple es posible conocer en qué medida tuvo lugar el efecto de dilatación temporal durante el vuelo de Kelly y Kornienko. La expresión matemática de la fórmula es:

$$t_m = t \times \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

donde v/c es la velocidad de la ISS como fracción de la velocidad de la luz; t_m hace referencia al tiempo en un marco de movimiento (en la ISS), y t , se refiere al tiempo en un marco de reposo (en la Tierra). Dado que la velocidad del complejo orbital es de unos 7,8 km/s (algo más de 28 000 km/h), y que la de la luz es de 299 793,05 km/s, la velocidad de la ISS expresada en una fracción de la de la luz es de 0,000026 c . Elevando esta cifra al cuadrado y restándosela a 1, obtenemos 0,9999999993. Aplicando la raíz cuadrada a dicho resultado, la cifra obtenida es de 0,9999999997, que se refiere a la duración, en años terrestres, de un año en órbita alrededor de nuestro planeta. En otras palabras, un año en el espacio es 0,0000000003 años más corto que en la Tierra, lo que equivale a 0,01 s. Teniendo en cuenta que Kelly y Kornienko pasaron en el espacio 340 días, la dilatación del tiempo en la misión fue, en realidad, de 0,0088 s.



El astronauta de la NASA Scott Kelly (izquierda) y el cosmonauta de ROSCOSMOS Mijaíl Kornienko, posan en una fotografía tomada antes de partir al espacio.

450 km de distancia de nuestro planeta provoca que la dilatación temporal se reduzca, al existir un menor potencial gravitatorio. Naturalmente, el efecto se vería potenciado en misiones que se desplazasen a fracciones de la velocidad de la luz.

UNA INICIATIVA DE UN SIGLO DE DURACIÓN

En el año 2010, con el auspicio de la NASA y de la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa de Estados Unidos (DARPA, por sus siglas en inglés), se puso en marcha el proyecto 100 Year Starship («Nave espacial del siglo»), una iniciativa de financiación de un año de duración destinada a la creación de un plan empresarial cuyo desarrollo podría englobar a varias generaciones y extenderse durante cien años, con el propósito de fomentar la investigación científica y tecnológica que permita el desarrollo de los vuelos interestelares.

La Dorothy Jemison Foundation for Excellence (Fundación Dorothy Jemison para la Excelencia), dirigida por Mae Jemison, científica que en 1992 se convirtió en la primera mujer afroestadounidense en volar al espacio, fue la entidad que obtuvo la financiación, en asociación con otras dos organizaciones, Icarus Interstellar y Foundation for Enterprise Development. Actualmente en solitario, la Jemison Foundation prosigue con esta iniciativa, conservando la denominación 100 Year Starship. Este proyecto persigue varios objetivos. En primer lugar, el desarrollo de infraestructuras que permitan dar el salto hacia las estrellas, como la creación de tecnologías revolucionarias de carácter no químico para generar, controlar y almacenar enormes cantidades de energía de forma segura. Además, también se impulsa el diseño y construcción de sistemas avanzados de soporte vital que permitan la fabricación de hábitats autónomos para su utilización en el espacio y en otros cuerpos celestes. Por último, otro objetivo básico del proyecto es la implementación de sistemas robóticos basados en inteligencia artificial, partiendo de la base de que el desafío de viajar a otros sistemas planetarios podrá generar actividades transformativas, nuevos conocimientos y tec-

nologías que redundarán positivamente en la sociedad mundial, tanto a corto como a largo plazo.

A fin de fomentar el interés y la colaboración en los ámbitos social, político, económico y científico, la iniciativa 100 Year Starship celebra simposios periódicos en los que representantes de los referidos sectores presentan los resultados de investigaciones y estudios que sirvan de base para la puesta en marcha de misiones humanas interestelares en el futuro.

Los proyectos encaminados a enviar a seres humanos más allá de nuestro sistema solar se encuentran, aún, en una fase muy incipiente. Se requerirá de décadas, e incluso de siglos, para establecer las infraestructuras necesarias que permitan materializar la ambiciosa empresa de dar el salto a otras estrellas.

La elección de un destino

Una vez desvelados los misterios que atesora el medio interestelar, y desarrolladas las capacidades reales de propulsión avanzada, nuestra especie deberá elaborar un mapa que identifique todos y cada uno de los mundos extrasolares considerados candidatos para la migración humana.

El estudio e identificación de los planetas extrasolares es un campo, dentro de la astronomía, que aún se encuentra en ciernes. Tan solo han pasado algo más de dos décadas desde que fuera descubierto el primer planeta en órbita alrededor de una estrella perteneciente a la secuencia principal. Aunque hoy en día los planetas ajenos a nuestro sistema solar detectados se cuentan por miles, las limitaciones que impone la tecnología no nos permiten, por ahora, conocer con detalle las características de aquellos exoplanetas que, *a priori*, consideramos habitables y que, por los motivos expuestos en el segundo capítulo, podrían perfectamente no serlo.

La elección de un destino extrasolar para el envío de seres humanos depende, principalmente, de tres factores. El primero de ellos es, como es obvio, la proximidad a la Tierra del planeta en cuestión. Huelga decir que cuanto más cerca se encuentre, la infraestructura necesaria para el viaje será más simple —dentro de la complejidad que entraña un vuelo extrasolar—, la duración del mismo será menor y las probabilidades de que tengan lugar incidencias a lo largo del trayecto disminuyen sensiblemente. El segundo de los factores lo constituyen las características físicas del planeta, como su gravedad, atmósfera y potencial de habi-

tabilidad. El tercer factor está estrechamente relacionado con el segundo, y se centra en la susceptibilidad del planeta a ser terraformado. La *terraformación* es la capacidad de intervenir en la atmósfera de un cuerpo celeste, ya sea planeta o luna, con el objetivo de transformarla y hacerla habitable para los organismos terrestres, desde los más simples a los más complejos, incluyendo a los seres humanos. De este modo se prescinde de las infraestructuras destinadas al soporte vital. Cualquier planeta o satélite extrasolar considerado candidato deberá ser susceptible de ser terraformado en caso de que fuera necesario, circunstancia más que probable, dado que las posibilidades de encontrar un planeta «gemelo» a la Tierra en propiedades y en atmósfera son infinitamente remotas. Obviamente, este proceso dependerá de las facultades que nuestra especie haya adquirido, con el transcurso de los años, en las técnicas de terraformación.

BÚSQUEDA DE OTROS HOGARES CELESTES

Con la información disponible en la actualidad, existen algunos planetas que, en principio, pueden considerarse candidatos a ser colonizados por tener una masa similar a la de la Tierra, ser de naturaleza rocosa y encontrarse orbitando en la zona habitable generada por su estrella matriz. Algunos de ellos ya los abordamos en el segundo capítulo, pero en las páginas siguientes los trataremos con mayor detalle.

Próxima b: el exoplaneta más cercano a nosotros

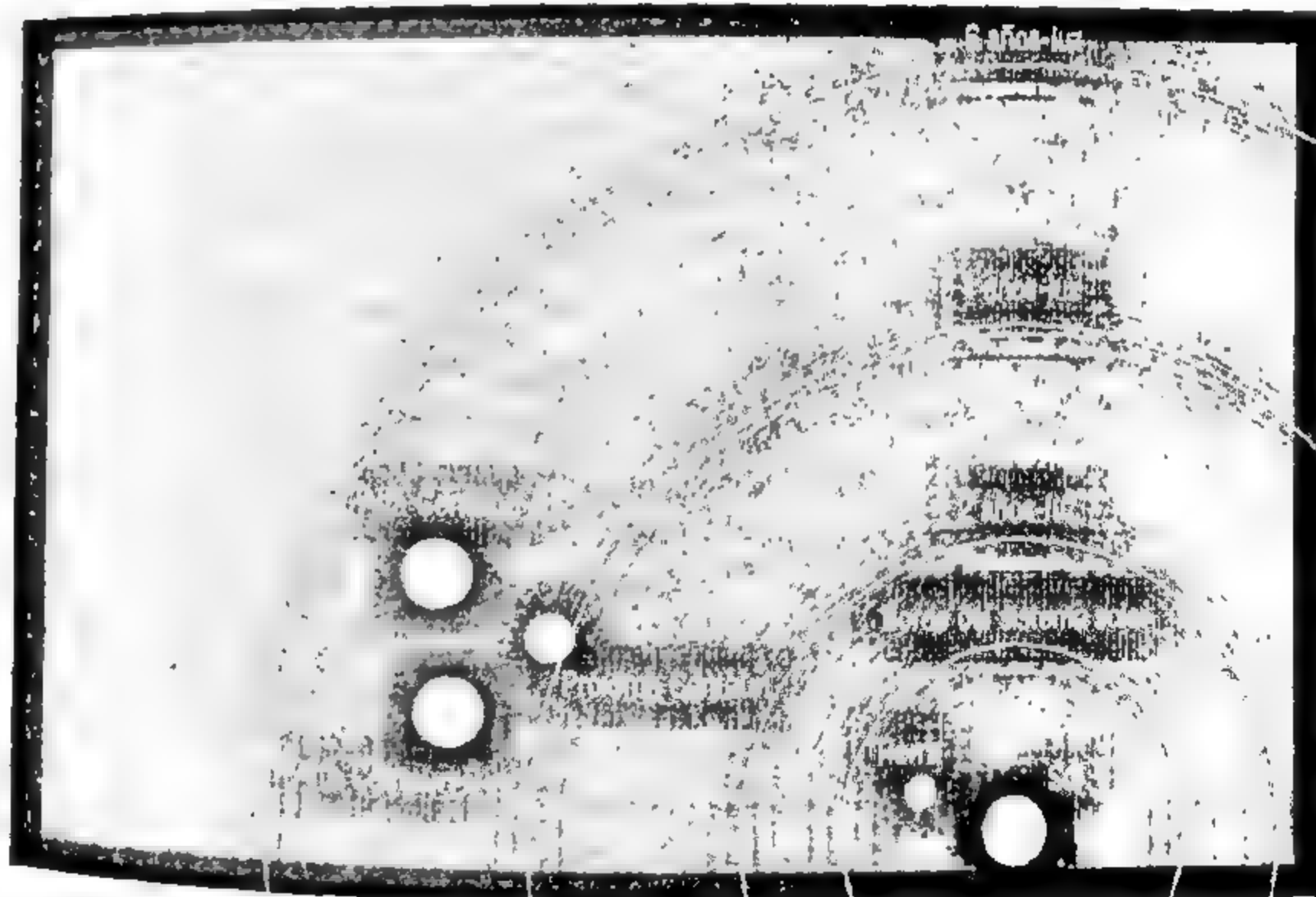
El exoplaneta más próximo a la Tierra se encuentra en la constelación de Centaurus (el Centauro), y se conoce como Próxima b o Alfa Centauri Cb. Su descubrimiento fue anunciado en agosto de 2016 por un equipo de científicos del Observatorio Europeo Austral (ESO) liderado por el astrofísico Guillem Anglada-Escudé, y se realizó mediante la técnica de medición de la velocidad radial de su estrella matriz, Próxima Centauri, una estrella enana

roja de tipo M, situada a tan solo 4,22 años-luz de distancia de nuestro sistema solar (figura 1), lo que convierte a Próxima b en uno de los primeros planetas candidatos a ser explorados mediante el envío de sondas robóticas.

Su masa es, aproximadamente, 1,3 veces superior a la de la Tierra, y la distancia a su estrella matriz es de 0,05 UA (unos 7,5 millones de kilómetros), circunstancia que hace que su periodo orbital sea muy breve, de 11,2 días.

La radiación que llega desde su estrella es eminentemente infrarroja, por lo que el planeta goza tan solo de un 2% de la luminosidad que la Tierra recibe del Sol. Dada la proximidad a su estrella matriz, Próxima b se encuentra expuesto a una radiación en la franja de los rayos X cuatrocientas veces superior a la recibida por la Tierra, por lo que el planeta parece, a primera vista, poco

FIG. 1



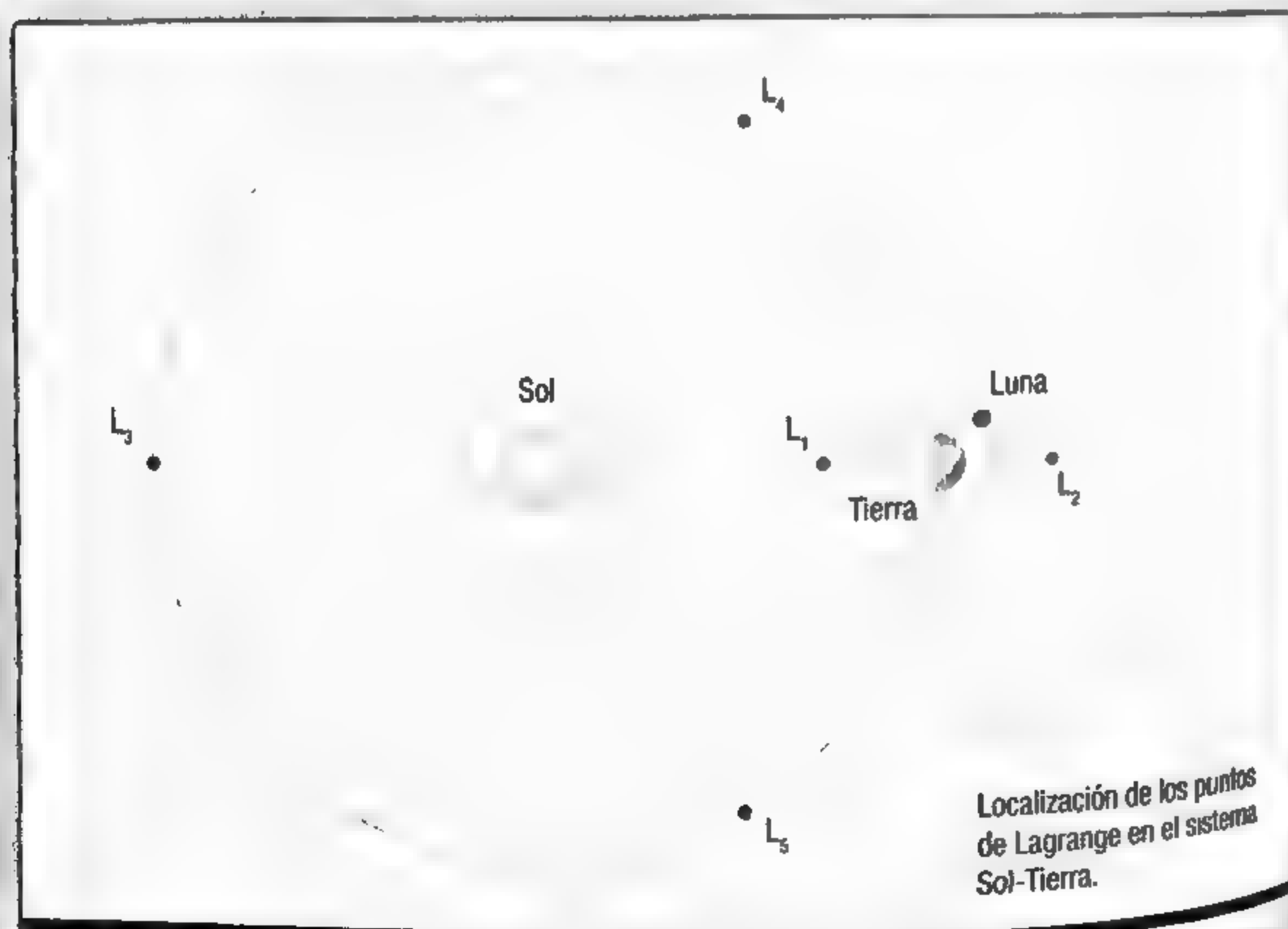
Ubicación de la estrella Próxima Centauri respecto de nuestro sistema solar. A su alrededor orbita Próxima b, el exoplaneta más cercano a la Tierra.

NUEVOS OJOS PARA OBSERVAR LAS PROFUNDIDADES DEL COSMOS

Desde que fuera lanzado al espacio en abril de 1990, el telescopio Hubble ha realizado incontables observaciones de los diferentes cuerpos celestes y fenómenos que tienen lugar en el universo conocido, convirtiéndose en el ingenio que más aportaciones ha realizado a la ciencia. Desde su órbita, a 600 km sobre nuestras cabezas, el telescopio ha recibido la visita de varias misiones tripuladas, con el propósito de actualizar sus instrumentos y sustituir los que dejaron de funcionar. En la última de ellas, los astronautas ampliaron la visión del Hubble noventa veces, lo que permitió observar cuerpos celestes situados a más de 13000 millones de años-luz. En 2018, un nuevo y potente telescopio, bautizado con el nombre de James Webb, en honor a uno de los primeros administradores de la NASA, y fruto de la colaboración entre la ESA, la Agencia Espacial Canadiense y la propia NASA, llevará la observación astronómica a un nivel superior y nos proporcionará más y mejores respuestas sobre nuestro lugar en el universo.

Un telescopio lagrangiano

A diferencia del Hubble, que se lanzó desde Cabo Cañaveral (Florida) a una órbita terrestre baja, el James Webb (JWST, por sus siglas en inglés) despegará desde el puerto espacial europeo de Kourou (Guayana Francesa) rumbo al segundo punto de Lagrange, uno de los cinco puntos situados en el espacio en los que un pequeño objeto, afectado únicamente por la gravedad, puede mantener una posición estable con relación a la Tierra y el Sol (véase la figura).



Aunque se trata de «miradores» ideales para observar el firmamento, los puntos de Lagrange se encuentran tan distantes que si un telescopio localizado en alguno de ellos fallase, sería muy poco probable que pudiera repararse, a diferencia de lo que ocurría con el Hubble.

Instrumental de última generación

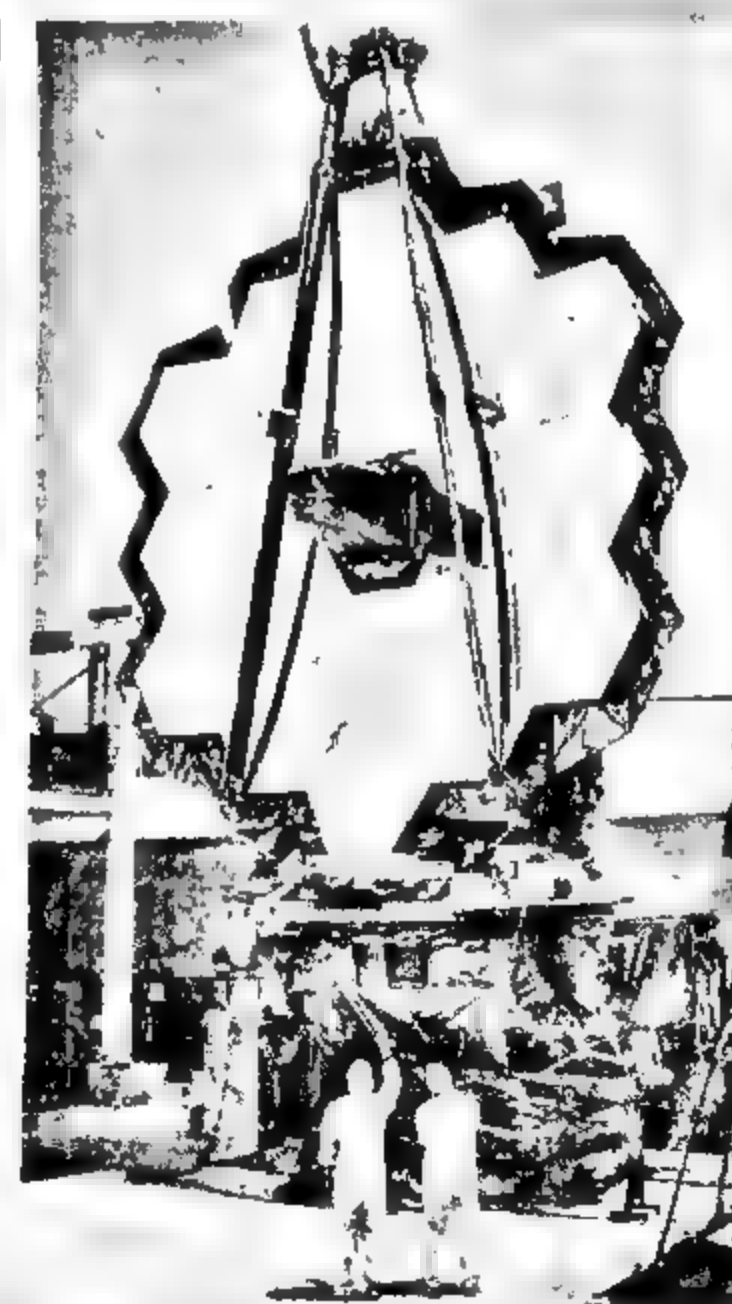
El JWST está dotado de un gran espejo principal de 6,5 m de diámetro, integrado por dieciocho segmentos hexagonales, que se encontrará protegido del Sol por un escudo, lo que permitirá su refrigeración pasiva hasta alcanzar cotas próximas a los -230°C y así detectar objetos distantes en longitudes de onda del infrarrojo. El telescopio alberga cuatro instrumentos, dos cámaras y dos espectrógrafos que operarán en el extremo y en el medio infrarrojo. El JWST será sensible a la luz en un rango de entre 0,6 y $28,5\text{ }\mu\text{m}$.

Probabilidades de encontrar vida extrasolar

La avanzada instrumentación del JWST convertirá al telescopio en una herramienta esencial para analizar la evolución de los sistemas planetarios y las posibilidades de que estos puedan albergar algún tipo de forma de vida. Será capaz de determinar la composición atmosférica de planetas extrasolares en los periodos en que estos transiten por delante de sus respectivas estrellas matriz, facilitando de este modo la identificación de planetas candidatos para su colonización.



A la izquierda, impresión artística del telescopio espacial James Webb en órbita. A la derecha, espejo principal del JWST, integrado por dieciocho estructuras hexagonales, durante su montaje en el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA en octubre de 2016.



habitable. Recordemos que las estrellas de tipo M y de baja masa son propensas a ser muy activas y emitir violentas llamaradas solares, que afectarían negativamente a la atmósfera y a la superficie del planeta. De hecho, el viento solar emitido por su estrella es tan intenso a la distancia a la que se encuentra Próxima b que es muy probable que este haya sido despojado de su atmósfera. No obstante, algunos científicos creen que podrían darse ambientes de habitabilidad en determinadas regiones no expuestas directamente a la actividad solar de Próxima Centauri como, por ejemplo, su subsuperficie. Existen aún muchas incógnitas por despejar, entre ellas la inclinación del eje del planeta o sus dimensiones, por lo que serán precisas nuevas observaciones. En la imagen superior de la página 95 se muestra una recreación artística de su superficie.

La proximidad a su estrella matriz también provoca que los periodos de rotación y traslación de Próxima b tengan la misma duración, un efecto denominado *acoplamiento de marea*. En consecuencia, una de sus «caras» se encuentra continuamente iluminada por su estrella, mientras que la otra está sometida a una noche perpetua.

Gliese 667Cc: ¿una pequeña Tierra?

Situado en la constelación de Scorpius (el Escorpión), su descubrimiento fue anunciado en noviembre de 2011 por astrónomos del ESO. Este exoplaneta guarda ciertos paralelismos con Próxima b. Se sitúa en la región habitable de una estrella enana roja de tipo M, con un periodo orbital de 28,12 días, y la radiación solar se aproxima al 90% de la que recibe nuestro planeta. Al igual que ocurre con Próxima Centauri, la mayor parte de esa radiación es emitida en la franja del infrarrojo, por lo que la luz visible que llega a Gliese 667Cc es un 70% inferior a la de la Tierra.

Este planeta se encuentra sensiblemente más lejos de nosotros que Próxima b, a unos 23,62 años-luz o 6,8 pc (un pársec, pc, es una unidad de medida que equivale a 3,26 años-luz, y se emplea para expresar distancias mayores). Al igual que Próxima b,

Gliese 667Cc fue descubierto mediante la técnica de medición de la velocidad radial de su estrella matriz, Gliese 667C, en torno a la cual orbitan también otros planetas.

Su masa es, aproximadamente, 0,33 veces superior a la de la Tierra. Los astrónomos han podido determinar sus dimensiones, que se acercan a los 0,42 radios terrestres. Según los cálculos de equilibrio térmico planetario —que, como explicábamos en el segundo capítulo, se basan en la temperatura recibida por el planeta a través de la radiación emitida por su estrella matriz, independientemente de que este posea o no atmósfera—, la temperatura en su superficie se sitúa en torno a los 3 °C, superior a la de la Tierra, que es de -18 °C.

Al igual que ocurre en Próxima b, Gliese 667Cc presenta acoplamiento de marea, por lo que uno de los hemisferios se encuentra expuesto continuamente a la estrella.

Kepler-452b: la sede del senado galáctico

En el universo de la popular saga espacial de ficción *Star Wars*, Coruscant es el planeta-capital de la República, sede del Senado Galáctico, y su superficie está totalmente ocupada por una gigantesca urbe. Desde el 23 de julio de 2015, este planeta ficticio tiene un análogo real, que se encuentra a unos 1 400 años-luz (430 pc) de nosotros, en la constelación del Cisne, orbitando la estrella Kepler-452, similar a nuestro Sol. Su denominación técnica es Kepler-452b y fue descubierto gracias al telescopio espacial Kepler de la NASA.

Este nuevo mundo es, potencialmente, lo que se denomina una *supertierra*, o sea, un cuerpo de tipo rocoso con una masa y tamaño superiores a los de nuestro planeta. Se emplea el término «potencialmente» porque aún no ha podido determinarse de forma definitiva su naturaleza rocosa. No obstante, todo hace sospechar que así es, dado que su masa es cinco veces superior a la de la Tierra. De tener superficie, la gravedad sobre ella duplicaría la que soportamos en nuestro planeta, una característica que haría bastante «incómo-

do» caminar sobre su superficie y, aún más, vivir allí, aunque estos cálculos están basados en estimaciones, no en datos concretos.

Kepler-452b es 1 500 millones de años más antiguo que la Tierra (figura 2). En el hipotético caso de que la vida hubiera surgido allí en el plazo en que lo hizo en nuestro planeta, y de que esta hubiera evolucionado hacia formas inteligentes en los mismos términos y marcos de tiempo, sus habitantes nos llevarían 1 500 millones de años de ventaja tecnológica, tiempo más que suficiente como para hacer cosas que hoy solo podemos concebir en el mundo de la ciencia ficción.

El hecho de que su estrella matriz sea similar al Sol hace que la región habitable que esta genera comprenda órbitas parecidas a las que abarca la producida por nuestra estrella. Kepler-452b se encuentra a 1,04 UA de Kepler-452, casi la misma distancia que separa la Tierra del Sol (1,00 UA). En consecuencia, su periodo orbital es similar al de nuestro planeta, siendo su duración de 385 días.

Sin embargo, la luminosidad de Kepler-452b es un 20% superior a la recibida por la Tierra. Además, el hecho de que su estrella matriz sea mil millones de años más vieja que nuestro Sol, supone que el planeta recibe un 10% más de energía (figura 2). En consecuencia, si Kepler-452b está dotado de atmósfera, esta podría sufrir un proceso de escape al espacio debido a la intensidad del viento solar, además de experimentar un fuerte efecto invernadero similar a Venus, aunque esto dependería de los componentes presentes en su atmósfera.

Wolf 1061c: aullidos en la constelación de Ophiuchus

A 13,8 años-luz de nosotros se encuentra la estrella Wolf 1061 (*wolf*, en inglés, significa «lobo»), una enana de tipo M situada

en la constelación de Ophiuchus (Ofiuco), en torno a la cual orbitan tres planetas. Uno de ellos, llamado Wolf 1061c, es otra de las consideradas supertierras. Tiene una masa y un radio 4,3 y 1,5 veces mayores que los de nuestro planeta, respectivamente, lo que hace suponer a los científicos que su densidad es muy similar a la de la Tierra, con una gravedad en superficie 1,6 veces superior a la terrestre.

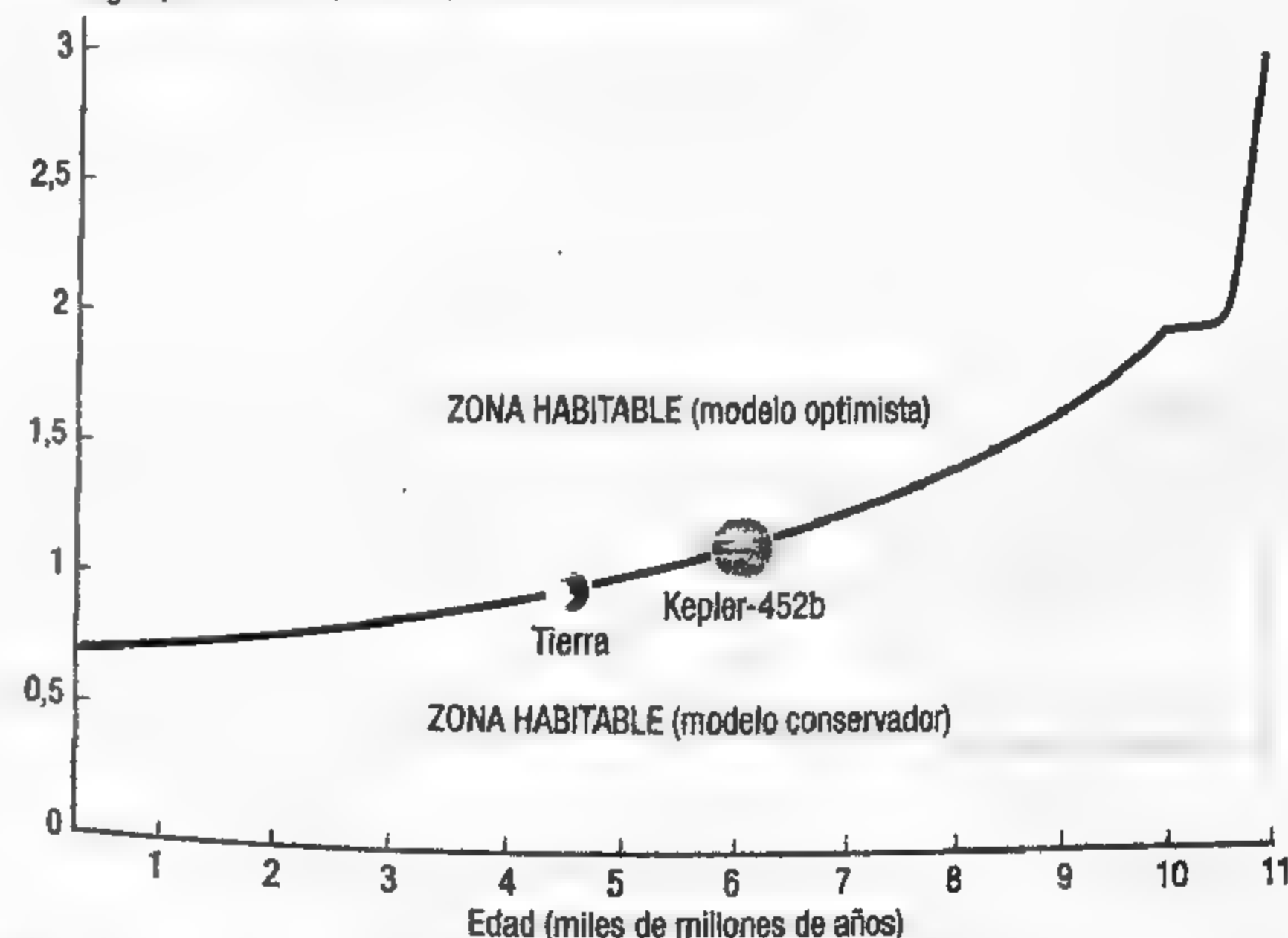
Su descubrimiento, realizado por un equipo de la Universidad de Nueva Gales del Sur (Australia) y hecho público el 17 de diciembre de 2015, fue el resultado de más de diez años de análisis de las medidas espectrales de su estrella matriz, para cuya realización se empleó el espectrógrafo de alta precisión HARPS, montado sobre un telescopio de 3,6 m de apertura del ESO ubicado en el Observatorio Astronómico de La Silla (véase la fotografía inferior de la página 95).

La humanidad probablemente no durará otros mil años sin abandonar nuestro frágil planeta. Debemos colonizar el espacio para sobrevivir.

STEPHEN HAWKING

FIG. 2

Energía que recibe el planeta (en relación con la Tierra)



Kepler-452b es 1 500 Ma más antiguo que la Tierra y recibe un 10% más de energía que nuestro planeta.

Wolf 1061c orbita alrededor de su estrella matriz a una distancia de 0,08 UA (alrededor de doce millones de kilómetros), es decir, casi cinco veces más cerca de lo que Mercurio se encuentra de nuestro Sol. Su periodo orbital, por tanto, es muy pequeño, de tan solo 17,9 días, y es muy probable que el planeta se encuentre sometido a un acoplamiento de marea. De ser así, sus temperaturas serían extremas, siendo las regiones próximas al *terminador* (la línea imaginaria que separa el hemisferio iluminado del oscuro) las que ofrecerían un mayor potencial de habitabilidad, aunque este podría verse ampliado en función de las características de su atmósfera y su capacidad de transportar la energía de un hemisferio al otro. A pesar de la proximidad con su estrella matriz, Wolf 1061c es un mundo muy oscuro, debido a que la luminosidad que llega al planeta es muy baja, alrededor de un 1% de la recibida en la Tierra procedente del Sol. El hecho de que la mayor parte de la radiación que alcanza el planeta sea infrarroja es el motivo por el que las temperaturas son tan altas en el hemisferio iluminado.

Los mundos de TRAPPIST-1

A 39 años-luz (12 pársecs) de nosotros, en la constelación de Acuario, encontramos tres exoplanetas candidatos para la colonización. Se hallan en un sistema solar integrado por su estrella matriz, TRAPPIST-1 y otros cuatro planetas, todos ellos de tamaños similares a la Tierra y bautizados con nombres que van desde TRAPPIST-1b hasta TRAPPIST-1h. Si pudiéramos situarnos en la superficie de alguno de los planetas que orbitan TRAPPIST-1, observaríamos un cielo dominado por la presencia de seis planetas, cuya proximidad permitiría advertir, a simple vista, algunos de los rasgos geológicos presentes en sus respectivas superficies. En caso de que alguno de ellos estuviera dotado de una atmósfera similar a la de la Tierra, quizá serían visibles fenómenos meteorológicos como formaciones nubosas y tormentas, lo que haría las delicias de cualquier científico planetario.

El descubrimiento de los primeros tres exoplanetas del sistema fue anunciado en mayo de 2016 por astrónomos del ESO.

¿UN SISTEMA SOLAR ANÁLOGO AL NUESTRO?

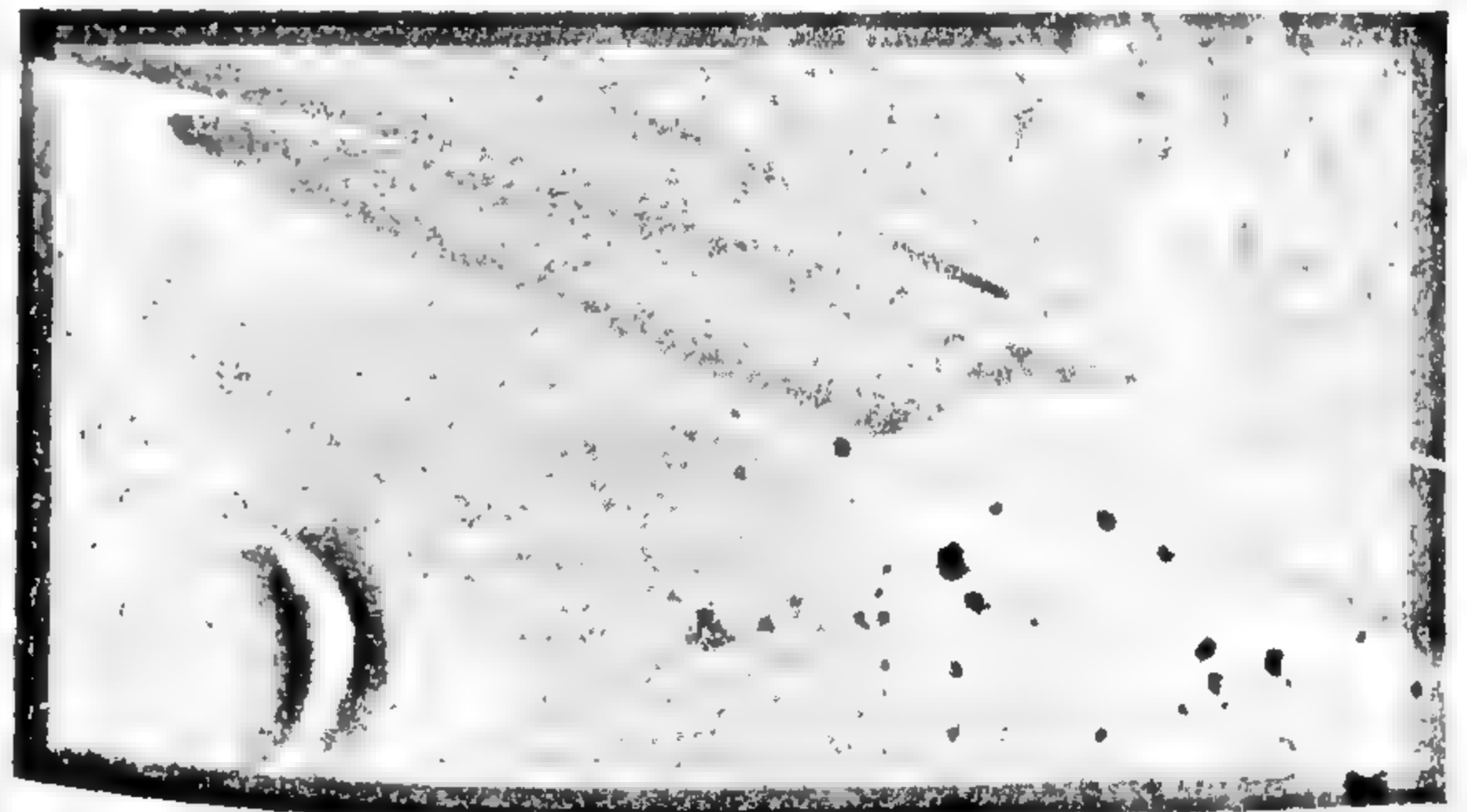
Un equipo de científicos liderados por Kate Su, de la Universidad de Arizona (Estados Unidos), hizo público en abril de 2017 el descubrimiento de un sistema solar que guarda ciertas similitudes con el nuestro. Situado a tan solo 10,5 años-luz en la constelación de Eridanus (Eridano), su estrella, Épsilon Eridani, es el vivo retrato de nuestro Sol en sus etapas más jóvenes. Las observaciones se realizaron mediante el Observatorio Estratosférico de Astronomía en Infrarrojo, o SOFIA por sus siglas en inglés. Se trata de un avión Boeing 747SP dotado de un telescopio de 2,5 m de apertura, fruto de la colaboración entre la NASA y la Agencia Alemana de Investigación Espacial (DLR). Observaciones realizadas por el telescopio Spitzer de infrarrojos, situado en órbita terrestre, han contribuido a caracterizar este sistema planetario.

Cinturones de escombros

Al igual que el nuestro, el sistema de Épsilon Eridani está dotado de dos cinturones. El primero de ellos, o cinturón interior, está constituido por asteroides. En su borde exterior se ha detectado la presencia de un planeta gaseoso, similar a nuestro Júpiter. Se cree que el segundo cinturón, situado en la región externa del sistema, está constituido por cuerpos helados, siendo una versión análoga del cinturón de Kuiper.

Enigmas por describir

Los científicos aún no han podido determinar la presencia de planetas rocosos alrededor de Épsilon Eridani. Su descubrimiento demostraría que la existencia de sistemas solares como el nuestro es más común de lo que, en principio, cabría esperar.



Impresión artística del sistema solar de Épsilon Eridani, cuyas características hacen creer a los científicos que podría tratarse de un sistema similar al nuestro.

Los cuatro restantes se detectaron durante las observaciones realizadas por el VLT (ESO) y el telescopio espacial Spitzer de la NASA

Las características del cuarto, quinto y sexto planetas del sistema (es decir, TRAPPIST-1e, 1f y 1g) fueron anunciadas en febrero de 2017. Estos cuerpos se localizan en la región habitable generada por su estrella, una enana ultrafría de tipo M, cuyas características la convierten en un astro muy longevo, con una edad que está comprendida entre los cuatro y los cinco billones de años, es decir, unas quinientas veces mayor que la vida de nuestro Sol.

Es un sistema planetario increíble, no solo por la cantidad de planetas que hemos hallado, sino porque tienen tamaños sorprendentemente parecidos al de la Tierra.

MICHAËL GILLON, SOBRE EL SISTEMA TRAPPIST-1

TRAPPIST-1e posee una masa y un radio de 0,62 y 0,92 veces los de la Tierra, respectivamente, siendo igualmente similar su temperatura de equilibrio planetario, que se sitúa en torno a los -22°C . Su densidad también es parecida a la de nuestro planeta, y los científicos estiman que su gravedad es un 74% de la terrestre, por lo que pasear por su superficie no entrañaría dificultad alguna. La distancia a su estrella matriz es pequeña, en concordancia con su periodo orbital, de seis días de duración. En consecuencia, el planeta se encuentra sometido a un acoplamiento de marea. Si está dotado de atmósfera, su zona habitable se situaría en las proximidades del terminador, y sería mayor o menor en función de las capacidades de esta para transferir energía térmica desde el hemisferio iluminado al hemisferio en sombra.

Al igual que su «hermano», TRAPPIST-1f es muy similar a la Tierra, con radio y masa de 1,04 y 0,68 veces los de nuestro planeta, respectivamente. Los científicos creen que la gravedad en su superficie es un 62% de la de la Tierra. Como ocurre con TRAPPIST-1e, la distancia a su estrella matriz es muy pequeña en términos astronómicos, ligeramente superior a los 5,5 millones de kilómetros, por lo que su periodo orbital es también muy breve, de 9,2 días, y se encuentra sometido a un acoplamiento de marea. La zona con mayores potenciales de habitabilidad, al igual



Arriba, impresión artística de la superficie del planeta Próxima b. Abajo, telescopio de 3,6 m de apertura del Observatorio de la Silla, que alberga el espectrógrafo HARPS, con el que se detectó en 2015 el exoplaneta Wolf 1061c.

que en TRAPPIST-1e, se encontraría próxima al terminador, ampliándose o restringiéndose en función de las características de su atmósfera, si la tuviera.

En cuanto a TRAPPIST-1g, con una masa y radio de 1,34 y 1,13 superiores a los de la Tierra, respectivamente, los científicos sospechan que tiene una gravedad un 5% superior a la de nuestro planeta. Se encuentra a algo más de 6,7 millones de kilómetros de distancia de su estrella matriz, circunstancia que, al igual que sus vecinos TRAPPIST-1e y TRAPPIST-1f, somete al planeta a un acoplamiento de marea e implica que su periodo orbital sea pequeño, de 12,3 días. Al igual que ocurre con todos los planetas del sistema, se desconoce por el momento si está dotado de atmósfera, lo que influiría notablemente en su potencial de habitabilidad.

Kepler-186f: un candidato lejano

Este exoplaneta, cuyo hallazgo fue anunciado en abril de 2014, está notablemente más alejado que cualquiera de los anteriores, situándose en la constelación del Cisne, a unos quinientos años luz de nuestro sistema solar. Fue el primer planeta con un radio similar a la Tierra en ser descubierto. El hallazgo se realizó gracias al telescopio espacial Kepler de la NASA, mediante la técnica de tránsitos. Se encuentra acompañado por otros cuatro planetas, sensiblemente mayores a la Tierra y mucho más próximos a su estrella matriz, una enana roja de tipo M.

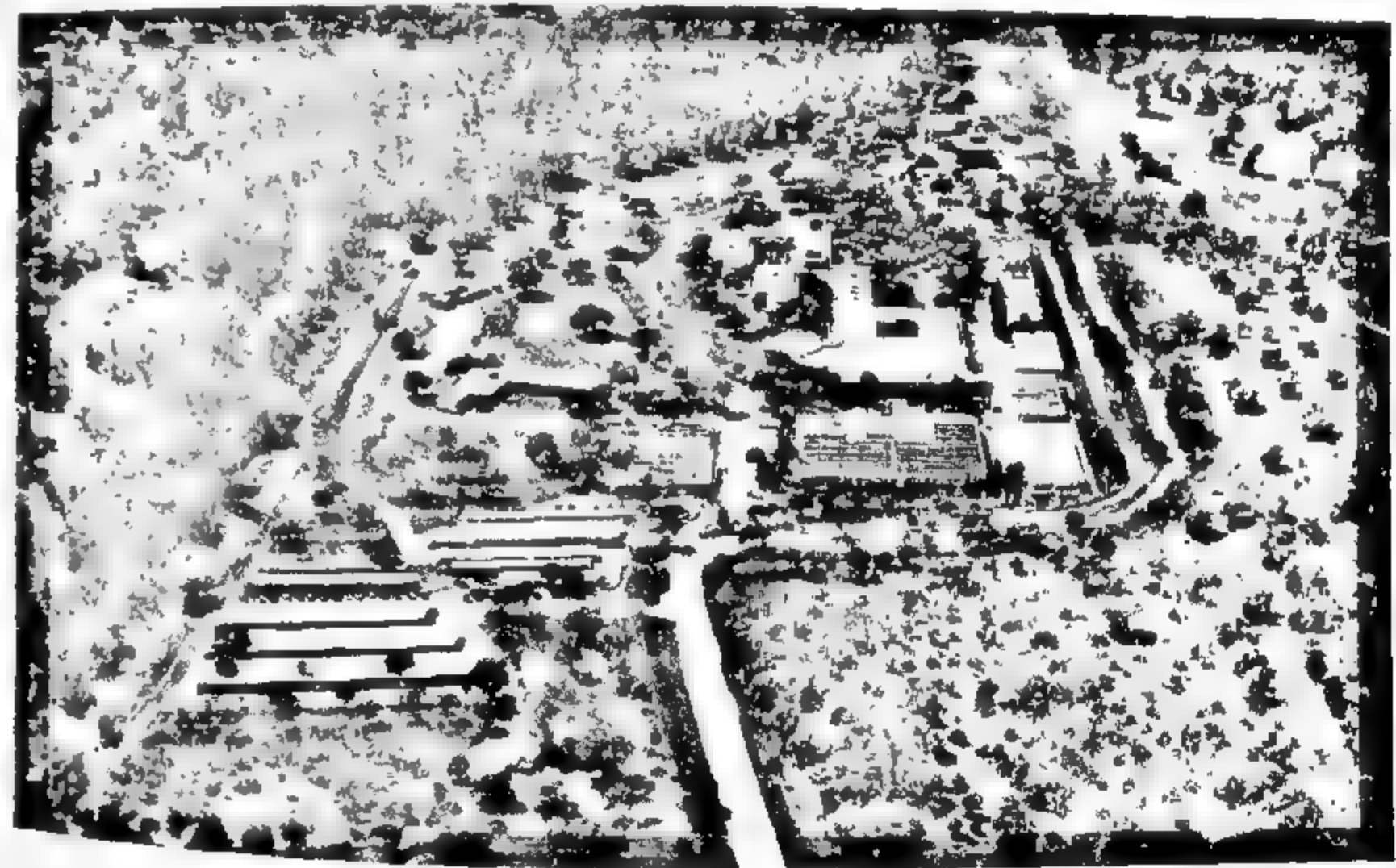
A tales distancias, determinar las características físicas de un cuerpo de tamaño similar al de la Tierra resulta muy difícil debido, por un lado, a la proximidad de este a su estrella matriz y, por otro, a las limitaciones que la tecnología actual nos impone. Teniendo presentes tales dificultades, los científicos creen que el radio de Kepler-186f es 1,17 veces superior al de nuestro planeta, estimando que su volumen podría ser 1,37 veces superior al terrestre, aproximadamente. Su masa se sitúa en un rango entre 0,32 y 3,77 veces la de la Tierra. En función de los datos obtenidos hasta ahora, no es posible determinar aún las caracte-

UN NUEVO CAZADOR DE EXOPLANETAS SE PREPARA PARA PARTIR AL ESPACIO

El año 2024 verá la puesta en marcha de un nuevo programa destinado a detectar y estudiar planetas extrasolares. Bautizada con el nombre de PLATO (acrónimo, en inglés, de «tránsitos planetarios y oscilaciones estelares»), esta misión, desarrollada por la ESA, despegará desde el puerto espacial de Kourou (Guayana Francesa) a bordo de un cohete Soyuz, y será colocada en el segundo punto de Lagrange con el propósito de realizar análisis en el campo de la astrosismología, que estudia los movimientos sísmicos en las estrellas, e intentar descubrir nuevos exoplanetas mediante la técnica de tránsitos.

Miles de sistemas solares a la espera de ser descubiertos

Los científicos del programa PLATO calculan que los sistemas solares descubiertos durante su misión podrían contarse por miles. Sus esfuerzos estarán enfocados en el hallazgo y caracterización de planetas similares al nuestro y supertierras situados en la zona habitable generada por sus respectivas estrellas matriz. PLATO tendrá la capacidad de detectar este tipo de sistemas planetarios gracias, entre otras cosas, a los datos obtenidos por otras misiones europeas como CoRoT y Cheops, lo que ayudará a los científicos a ubicar la arquitectura de nuestro sistema solar en el contexto de otros sistemas planetarios. La información que PLATO obtenga durante su misión se enviará para su estudio y análisis al Centro Europeo de Astronomía Espacial (ESAC, por sus siglas en inglés).



Vista aérea del Centro Europeo de Astronomía Espacial (ESAC), perteneciente a la ESA y establecido en las proximidades de Madrid, España. Estas instalaciones son las responsables de recopilar y catalogar los datos obtenidos por todas las misiones científicas de la ESA.

rísticas del planeta, pudiendo tratarse desde un planeta rocoso sin atmósfera a un mundo oceánico o de hielo, dotado de una atmósfera muy densa.

Kepler-186f orbita su estrella matriz a una distancia de casi sesenta millones de kilómetros, siendo su periodo orbital de 129,9 días. El planeta recibe aproximadamente un 32% de la luminosidad existente en la Tierra, es decir, prácticamente la misma que la que recibe Marte.

El planeta se encuentra en el extremo exterior de la región habitable generada por su estrella matriz, aunque ello no garantiza que este reúna las condiciones para la vida, máxime teniendo en cuenta que no es posible determinar si Kepler-186f está dotado o no de atmósfera.

UN LARGO CAMINO POR RECORRER

Como explicábamos al principio del capítulo, la exoplanetología o, dicho de otro modo, el estudio de los planetas extrasolares es un área del conocimiento científico que aún se encuentra en un estadio incipiente de desarrollo. Apenas podemos atisbar las dimensiones, densidades y atmósferas de estos mundos tan lejanos como enigmáticos. Las grandes distancias que nos separan de estos cuerpos y las limitaciones tecnológicas son dos de los principales factores que nos impiden conocer sus características con detalle.

Ingenios espaciales de nueva generación como el Telescopio James Webb nos permitirán profundizar en cierta medida en el conocimiento de estos planetas, pero transcurrirán aún decenas de años hasta que nuestra tecnología haga posible obtener información sobre ellos en cantidad y detalle suficientes como para poder esbozar el primer mapa que nos sirva de guía en el viaje de la especie humana hacia otras estrellas.

CAPÍTULO 6

El factor humano

La participación humana en vuelos espaciales conlleva grandes riesgos, que aumentarán notablemente cuando decidamos emprender el viaje hacia las estrellas. Pero mucho antes, deberemos enfrentarnos a nuevos desafíos de cuyo éxito depende que esta ambiciosa empresa sin precedentes llegue a materializarse.

Durante estos primeros sesenta años de astronáutica, la experiencia nos ha demostrado cuán difícil es diseñar máquinas capaces de realizar tareas complejas más allá de la atmósfera terrestre, un ambiente muy poco favorable, dominado por la ausencia de presión y por la amplitud y contraste térmicos.

Las misiones con destino a la superficie de planetas como Marte o Venus, además de tener que sobrevivir al ambiente del espacio exterior, deben ser capaces de resistir la entrada en sus respectivas atmósferas y soportar presiones que, en el caso de Venus, son casi cien veces superiores a la de nuestro planeta. Esos factores son los causantes de que la tasa de fracasos en la exploración planetaria sea tan alta. Un ejemplo de ello lo encontramos en las misiones con destino a Marte, de las que cerca de la mitad han finalizado en el más absoluto de los silencios, al perder todo contacto con los ingenios.

Las misiones robóticas tienen varias ventajas frente a las tripuladas. La primera es que, al no portar seres vivos, no llevan incorporados sistemas de soporte vital, lo que las hace más simples y, por ello, más baratas. Por otra parte, los accidentes son eventos perfectamente asumibles, dado que no existe el riesgo

de pérdida de vidas. Sin embargo, la participación humana tiene ventajas que la robótica no posee, entre ellas la capacidad de respuesta. Un ser humano tiene la facultad de reaccionar con rapidez ante las incidencias, y de adaptarse con presteza a condiciones cambiantes. En misiones exploratorias, la balanza se inclina actualmente y de manera obvia hacia la alternativa robótica, dado que no es necesario aún exponer vidas humanas en esta empresa. Pero debemos considerar esta vía como el cimiento principal en el que se asentará, en el futuro, la expansión humana, no solo en nuestro sistema solar, sino más allá.

MARTE COMO CAMPO DE ENSAYOS

Antes de emprender el camino hacia las estrellas, el ser humano deberá enfrentarse al desafío de establecerse de manera permanente en otros planetas del sistema solar. Marte, por sus características, es el candidato perfecto. La siguiente tabla, en la que se comparan las principales características de la Tierra y sus planetas vecinos, Venus y Marte, permite comprobar fácilmente la similitud entre este último y nuestro planeta.

	Venus	Tierra	Marte
Gravedad	0,91 g	1 g	0,38 g
Duración del día	116,7 días	24 h	24,66 h
Duración del año	224,7 días	365,2 días	686,9 días
Inclinación del eje	177,4°	23,5°	25,2°
Radiación solar media recibida por el planeta	655 W/m ²	345 W/m ²	147 W/m ²
Temperatura media de la superficie	460 °C	15 °C	-60 °C
Presión atmosférica en la superficie	95 bar	1 bar	0,008 bar
Principales gases presentes en su atmósfera	Dióxido de carbono	Nitrógeno Oxígeno	Dióxido de carbono

Su tamaño es, aproximadamente, la mitad que el de la Tierra, sus días tienen una duración de 24,6 horas, su gravedad es relativamente confortable (un tercio de la terrestre), la inclinación de su eje es similar a la de la Tierra —lo que permite la existencia de estaciones—, se encuentra cerca de nosotros y su atmósfera, aunque incompatible con la vida humana, genera un rango térmico no excesivamente agresivo. Todo ello hace del planeta rojo el lugar ideal para el establecimiento de las primeras bases humanas de tipo planetario.

La problemática del viaje en el presente

Con la tecnología actual, llegar a Marte requiere entre siete y once meses de viaje. La *ventana de lanzamiento*, es decir, el momento idóneo para poner en marcha una misión espacial, se abre en los periodos de oposición planetaria de Marte con la Tierra, en los momentos en los que ambos cuerpos se encuentran más cerca entre sí, una circunstancia que tiene lugar cada dos años.

Las misiones humanas de larga duración realizadas en la actualidad, que oscilan entre los tres y los seis meses, han demostrado que el ambiente de microgravedad provoca serios trastornos fisiológicos en el cuerpo humano, siendo la pérdida de masa ósea y muscular, así como la atrofia cardíaca —el corazón es, en definitiva, otro músculo más de nuestro organismo—, los principales problemas a los que el cuerpo humano debe enfrentarse tras una misión de tales características. Habida cuenta de que, con los medios actuales, una expedición humana podría tardar en alcanzar Marte el doble de tiempo del que actualmente se invierte en misiones tripuladas de larga duración, y de que a dicho periodo habría que añadir dos años hasta la siguiente ventana de lanzamiento, el objetivo no podría lograrse de manera satisfactoria sin la implementación de sistemas que eviten el referido deterioro fisiológico. Para ello existen tres vías: reducir la duración del viaje, someter a la tripulación a animación suspendida o establecer un sistema que dote a determinadas partes de la nave espacial de gravedad artificial.

En lo referente a la reducción del tiempo de viaje, como explicábamos en el cuarto capítulo, se está trabajando en varias opciones, entre ellas los motores iónicos —poco versátiles en destinos cercanos pero muy efectivos en los remotos— y la propulsión nuclear, siendo esta última muy polémica por los grandes riesgos que entraña la tecnología actualmente disponible, basada en la fisión. En cuanto a la animación suspendida, se fundamenta en técnicas que aún no han sido probadas en humanos. La tercera opción ha sido defendida desde el siglo xx por científicos e ingenieros como Konstantín Tsiolkovski, Herman Potočnik y Wernher von Braun, y se basa en el uso de estructuras toroidales incorporadas a los vehículos espaciales (figura 1). La fuerza centrífuga generada por estas al rotar continuamente permitirían el establecimiento, en el interior del toroide, de un ambiente de gravedad artificial.

Adaptando el planeta a las necesidades humanas

Una vez solucionado el problema del viaje, el establecimiento de colonias sobre la superficie marciana solo será cuestión de tiempo. Los primeros asentamientos estarán basados en estructuras presurizadas y dotadas de sistemas de soporte vital, circunstancia que limitará sobremanera la expansión del ser humano en el planeta.

Las características de Marte lo convierten en el campo de ensayo ideal para el desarrollo de técnicas de terraformación, que se basan en la modificación de las características de un cuerpo celeste para hacerlo habitable y dotarlo de una atmósfera respirable, y así poder prescindir de sistemas artificiales de soporte vital. El sometimiento de Marte a este proceso permitiría su posterior colonización a gran escala.

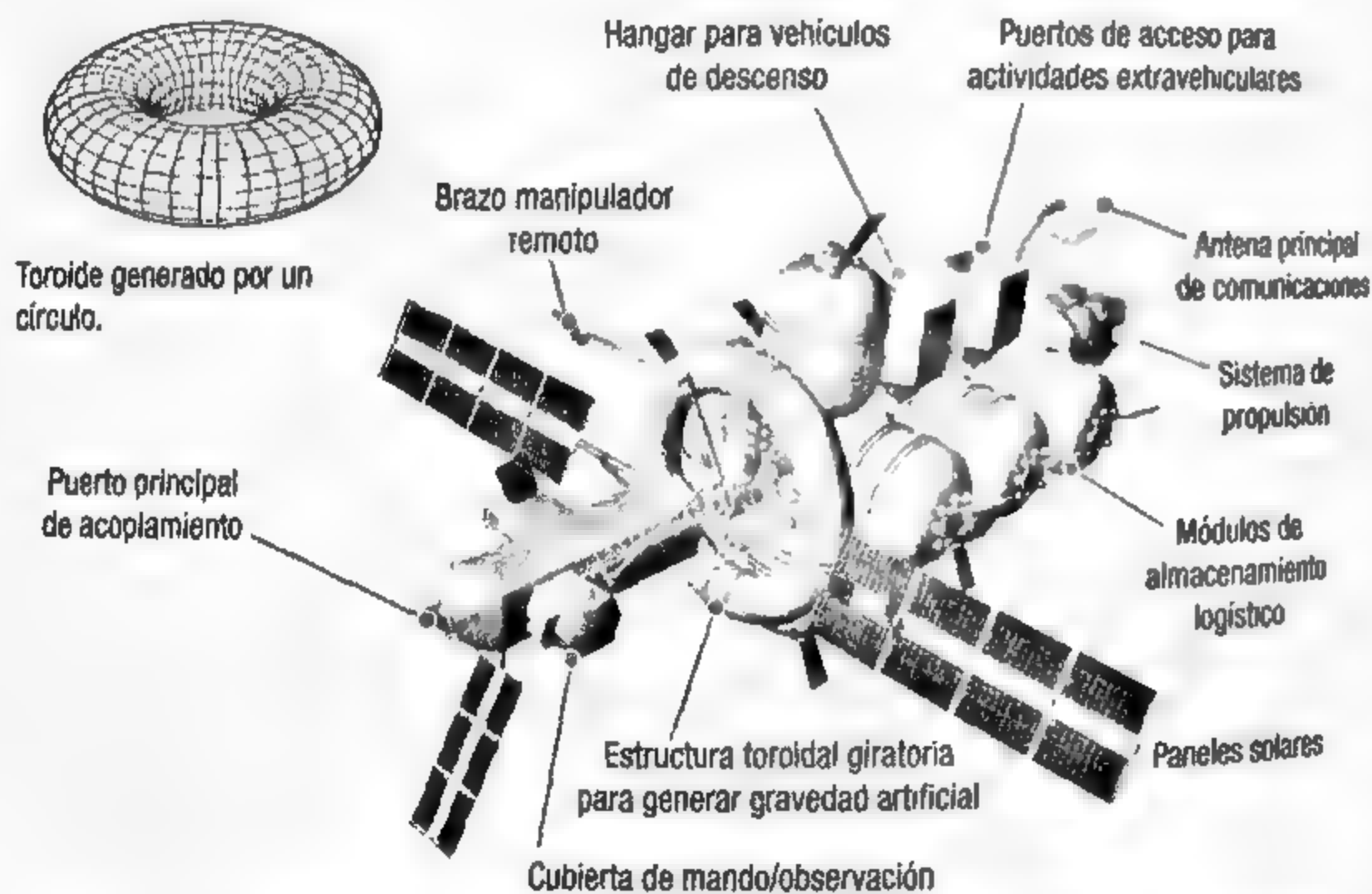
Las condiciones que presenta el planeta rojo hacen que la terraformación sea un hecho factible, incluso con la tecnología actual. La tabla siguiente resume los ingredientes esenciales para el desarrollo de vida en Marte.

	Presión en superficie del CO ₂	Presión en superficie del N ₂	Profundidad del agua oceánica*
Cantidad necesaria para la habitabilidad de plantas y microbios	2 bar	0,01 bar	500 m
Cantidad necesaria para generar una atmósfera respirable	0,2 bar	0,3 bar	500 m
Cantidad presente actualmente en la atmósfera de Marte	0,01 bar	0,00027 bar	0,000001 m
Cantidades estimadas existentes en la formación del planeta	0,1-20 bar	0,002-0,3 bar	8-1 000 m

(*) La cantidad de agua se mide en términos de profundidad de un océano cubriendo la totalidad de la superficie de Marte.

Las exploraciones robóticas realizadas hasta la fecha han puesto de manifiesto que Marte era, en el pasado, un planeta muy parecido a la Tierra, con una atmósfera cuya presión permitía la

FIG. 1



Propuesta de la NASA realizada en 2011 para la construcción del Nautilus-X, un vehículo espacial para viajes interplanetarios tripulados. Dentro del toroide en rotación los objetos son empujados hacia las paredes por la fuerza centrífuga, lo que proporciona una sensación de gravedad.

...las distancias que deben recorrerse a escala galáctica. Pero, ¿cómo podríamos contemplar nuestra Via Láctea desde la distancia? Los científicos plantean una posibilidad: habitar en una estación espacial que se encuentre fuera del sistema solar.



Brazo de Orión

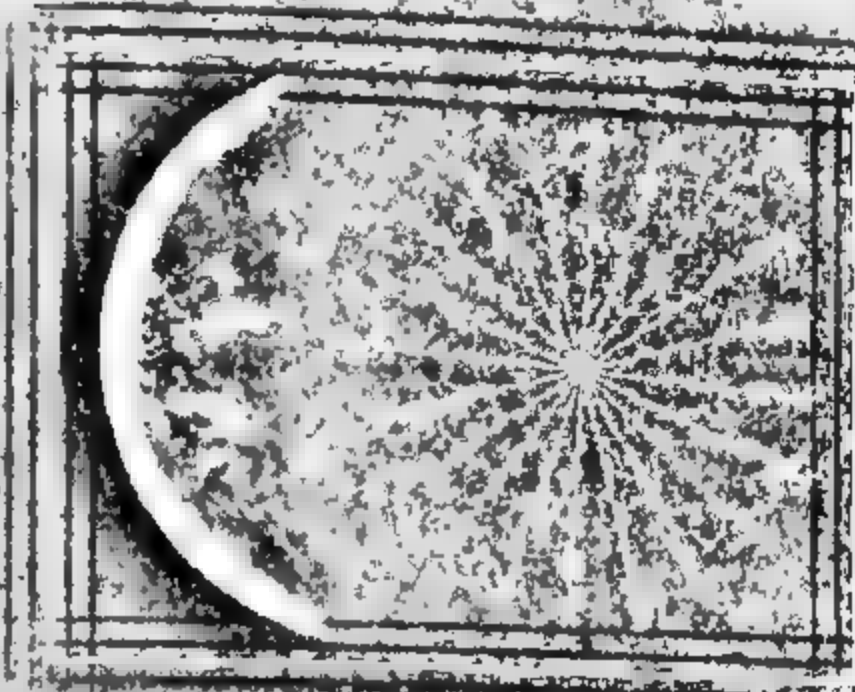
...enave viajero. En cinco años, el tiempo que se separa la Tierra de la heliopausa, el límite de nuestro sistema solar.



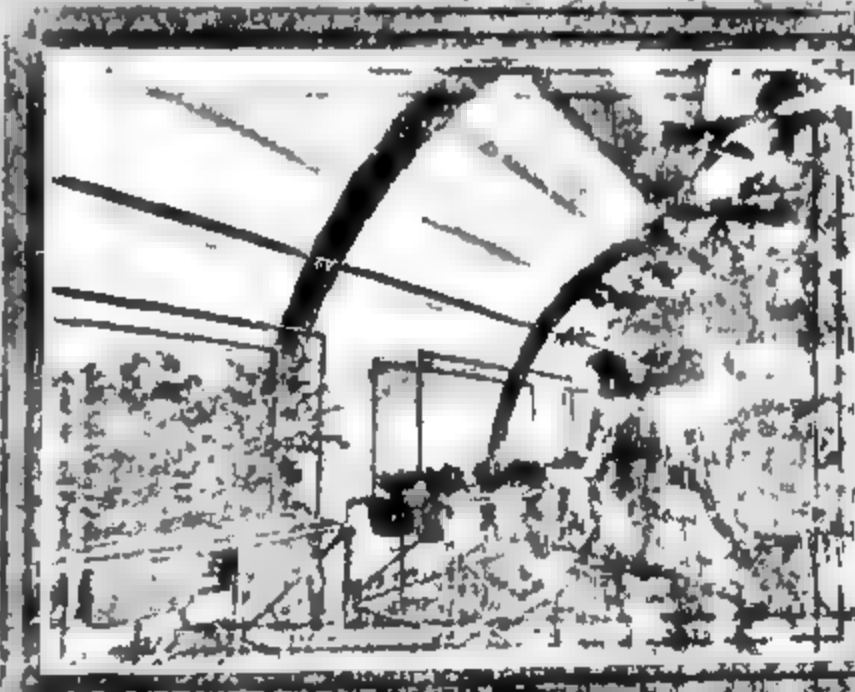
LA VÍA DE LA VIDA
...la vida en otros planetas. Los científicos creen que la vida podría existir en otros planetas de la Vía Láctea. Pero, ¿cómo podríamos encontrarla? Los científicos plantean una posibilidad: habitar en una estación espacial que se encuentre fuera del sistema solar.



EL MUNDO DE LOS FUTUROS
...el mundo de los futuros. Los científicos creen que el mundo de los futuros podría ser muy diferente al mundo actual. Pero, ¿cómo podríamos llegar a ese mundo? Los científicos plantean una posibilidad: habitar en una estación espacial que se encuentre fuera del sistema solar.



LA VÍA DE LA VIDA
...la vida en otros planetas. Los científicos creen que la vida podría existir en otros planetas de la Vía Láctea. Pero, ¿cómo podríamos encontrarla? Los científicos plantean una posibilidad: habitar en una estación espacial que se encuentre fuera del sistema solar.



EL MUNDO DE LOS FUTUROS
...el mundo de los futuros. Los científicos creen que el mundo de los futuros podría ser muy diferente al mundo actual. Pero, ¿cómo podríamos llegar a ese mundo? Los científicos plantean una posibilidad: habitar en una estación espacial que se encuentre fuera del sistema solar.

existencia de importantes masas de agua líquida en su superficie, formando mares, océanos y lagos. Sin embargo, hoy en día es un gigantesco desierto y ello se debe, en gran medida, a que sus gases atmosféricos llevan millones de años escapando al espacio exterior. El enfriamiento del núcleo de Marte y la consecuente desaparición de su campo magnético es la principal causa por la que el planeta rojo ha perdido gran parte de su atmósfera, al quedar esta expuesta directamente al viento solar. ¿Puede revertirse este efecto? Probablemente sí, mediante un proceso que el biólogo Robert Haynes, de la Universidad de York, ha denominado *ecopoyesis*, y que consiste en hacer más densa la atmósfera de Marte, aumentando sus niveles de dióxido de carbono.

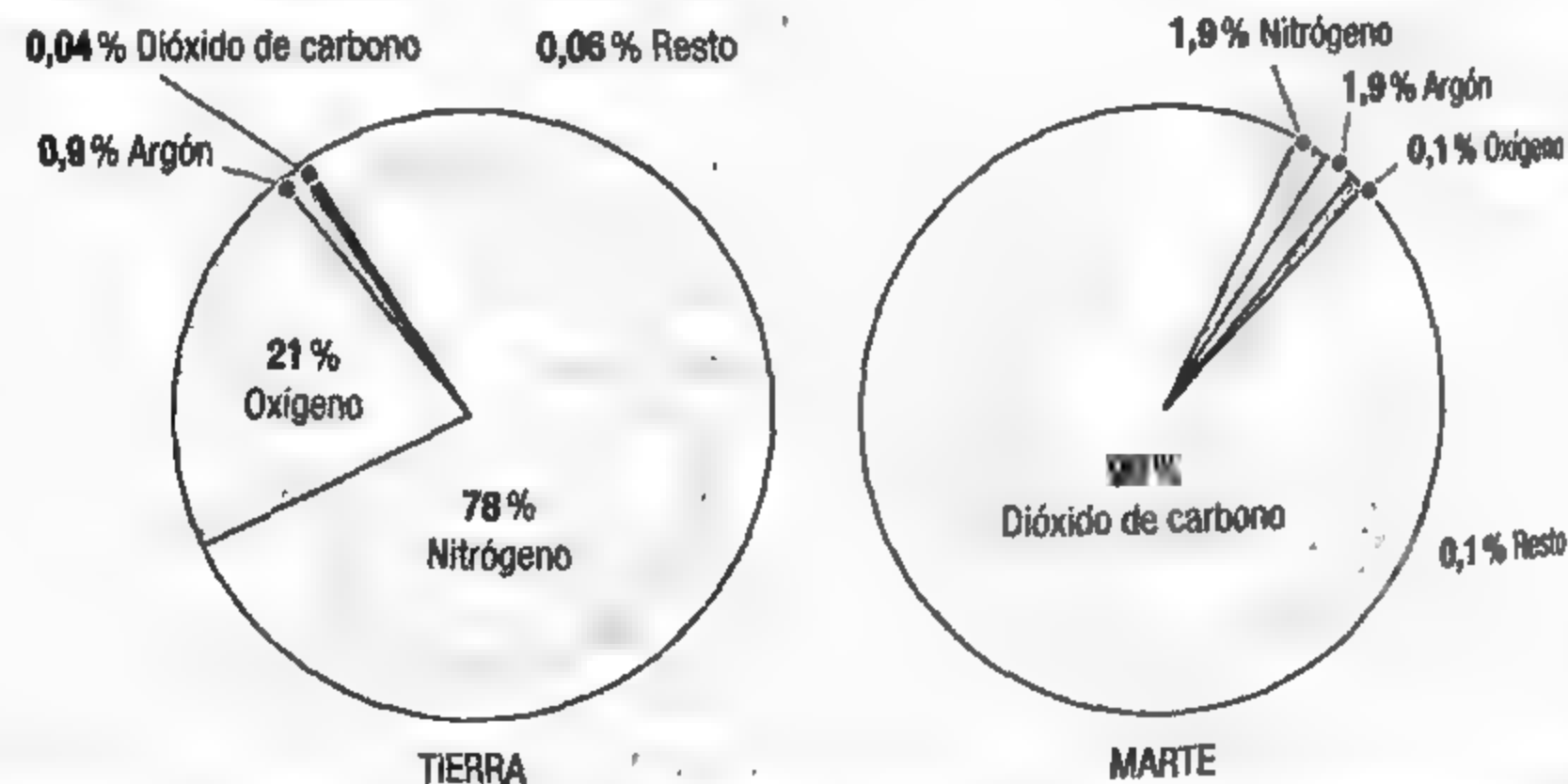
¿Cómo hacer respirable el aire de Marte? La atmósfera terrestre reúne unas características tan particulares que no han sido halladas aún en la de ningún otro cuerpo celeste conocido: un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y algo menos de un 1% de dióxido de carbono y otros gases como el argón, todo ello en presencia de vapor de agua. Replicar estas condiciones en Marte no es tarea fácil (figura 2). Se precisan ingentes cantidades de

esos gases para terraformar el planeta. En el caso del nitrógeno, sería necesaria una cantidad superior al billón de toneladas para hacer respirable el aire de Marte. Por tanto, se hace necesario obtener tales gases a partir de los compuestos presentes en la superficie del planeta. De lo contrario, el proceso de terraformación se dilataría demasiado en el tiempo, al tener que recurrir a fuentes externas. Las misiones robóticas enviadas al planeta nos han proporcionado una información muy reducida sobre las cantidades de estos gases presentes en la superficie marciana, por lo que es de vital importancia continuar con el envío de ingenios robóticos, aunque en algún momento la participación humana será inevitable.

El proceso de terraformación comenzaría, al igual que el de habitabilidad, con una elevación de la temperatura del planeta, lograda a partir de la radiación solar. Algunos científicos atmosféricos, como el británico James Lovelock —creador y defensor de la hipótesis Gaia, según la cual la habitabilidad de la Tierra es generada por la presencia de seres vivos en ella—, creen que el aumento de temperatura necesario para generar este proceso se podría conseguir inyectando en la atmósfera marciana gases de efecto invernadero, como el metano —cuyo efecto es veinte veces superior al del dióxido de carbono—, el óxido nítrico, el amoníaco y los perfluorocarbonos (PFC), pudiendo incrementarse así la temperatura de la atmósfera en unos 20°C. De este modo, la media registrada en el planeta se situaría en torno a los -40°C, una cota que provocaría la sublimación del dióxido de carbono y, en determinados puntos en los que se registrasen temperaturas superiores a 0°C, la del agua. Estos compuestos se encuentran actualmente congelados en la superficie y en los polos de Marte. Su sublimación y emisión a la atmósfera se traduciría en nuevas emisiones de dióxido de carbono y de vapor de agua, aumentando aún más la temperatura media del planeta.

Para lograr llevar a buen término este proceso, se hará necesaria la instalación de procesadores a lo largo y ancho de Marte, capaces de sintetizar continuamente los elementos necesarios a partir de los compuestos localizados en la superficie del planeta y emitirlos posteriormente a la atmósfera.

FIG. 2



Además de ser mucho menos espesa, la atmósfera de Marte tiene una composición química muy distinta a la de la Tierra, como muestran las gráficas.

LA ECOPOYESIS COMO PASO PREVIO HACIA LA TERRAFORMACIÓN

Bajas temperaturas, aridez y una tenue atmósfera en la que predomina el dióxido de carbono son las características definitorias del planeta Marte. Las tres se encuentran interrelacionadas y, por tanto, la alteración de una de ellas dará como resultado un cambio en las otras dos. La intervención humana y los procesos biológicos son los factores esenciales para producir tales cambios en el planeta.



Impresión artística que refleja los cambios producidos en el aspecto general de Marte durante el proceso de terraformación de nuestro planeta vecino.

La clave: el dióxido de carbono

El dióxido de carbono es el gas predominante en la atmósfera de Marte. Junto al metano, es uno de los conocidos como gases de efecto invernadero, cuyas emisiones indiscriminadas en la atmósfera terrestre están provocando de manera acelerada un aumento de la temperatura a nivel planetario, el cual conlleva, a la larga, un cambio climático. Los efectos no deseados en la Tierra, sin embargo, podrían resultar positivos en Marte en términos de habitabilidad. Una mayor concentración de este gas en nuestro vecino rojo provocaría un aumento de la presión y el calentamiento global de la atmósfera del planeta, factores que propiciarían que Marte alcanzara cotas térmicas superiores al punto de congelación del agua, permitiendo que esta fluyera por su superficie en estado líquido.

El papel del nitrógeno

La atmósfera de Marte carece de nitrógeno (solo se han detectado vestigios). Sin embargo, este gas se encuentra presente en la superficie del planeta, concretamente en forma de nitratos. La liberación de determinados microorganismos en el terreno marciano contribuiría a que estos extrajeran el nitrógeno a partir de los nitratos, y posteriormente lo emitieran a la atmósfera. Las cantidades obtenidas de este gas podrían suplir las necesidades metabólicas de diversas formas de vida, como las plantas y otros organismos fotosintéticos, claves en el proceso de terraformación.

La generación de un escudo antirradiación

Las emisiones de oxígeno producidas por la degradación fotoquímica del dióxido de carbono propiciarían la generación de una primitiva capa de ozono estratosférico, que serviría de escudo natural contra la radiación ultravioleta emitida por el Sol. En esencia, todos estos procesos darían como resultado una atmósfera que, si bien no sería respirable por ser aún rica en dióxido de carbono, permitiría el desarrollo de ciertas formas de vida, el establecimiento de cultivos a gran escala y la formación de masas forestales. El aumento de la presión atmosférica haría prescindible el empleo de trajes espaciales para caminar sobre la superficie de Marte, aunque para poder respirar necesitaríamos hacer uso de máscaras de oxígeno.

La complejidad de la terraformación

Modificar las condiciones atmosféricas de un planeta es una tarea muy compleja y llena de incógnitas que no nos permite, *a priori*, conocer con detalle sus resultados a corto, medio o largo plazo. Se trata del mismo problema al que nos enfrentamos en la Tierra. Los efectos de la actividad humana están contribuyendo a acelerar el calentamiento global, y los modelos de evolución climática deben ser continuamente revisados ante la aparición de patrones y fenómenos que, hasta ahora, eran desconocidos. Se hace, por tanto, necesario un estudio muy detallado de las características de la atmósfera de Marte antes de poner en marcha cualquier iniciativa en este sentido. Un mínimo error en los cálculos podría dar lugar a un escenario catastrófico que podría hacer de Marte un planeta definitivamente inhabitable.

El momento ideal para poner en marcha estos procesos de habitabilidad y terraformación de Marte tendría lugar una vez que se hubiera descartado la presencia de formas de vida autóctonas en el planeta. De lo contrario, tales procesos podrían suponer una extinción de las mismas al cambiar sustan-

Suponemos que Marte es un planeta sin vida, pero ello debe certificarse con la mayor de las certidumbres antes de transferir vida desde la Tierra.

CHRISTOPHER P. MCKAY

cialmente su ambiente natural, un escenario que iría en contra de los acuerdos internacionales en materia de vida extraterrestre firmados por las principales potencias mundiales.

Alterar de manera tan significativa el ambiente de un planeta conlleva sus riesgos, dado que la respuesta a largo plazo del sistema a la intervención humana es desconocida, pudiendo generarse un escenario que escapase totalmente a nuestro control. En la mayoría de los casos, los cambios ambientales registrados en la Tierra han tenido consecuencias negativas, y han dado como resultado la extinción de algunas formas de vida. Es por ello que, antes de iniciarse cualquiera de los procesos mencionados, nuestra especie deberá tener en cuenta multitud de consideraciones, no solo en el ámbito científico y tecnológico, sino también en el moral.

LA SUPERVIVENCIA HUMANA EN MISIONES INTERESTELARES

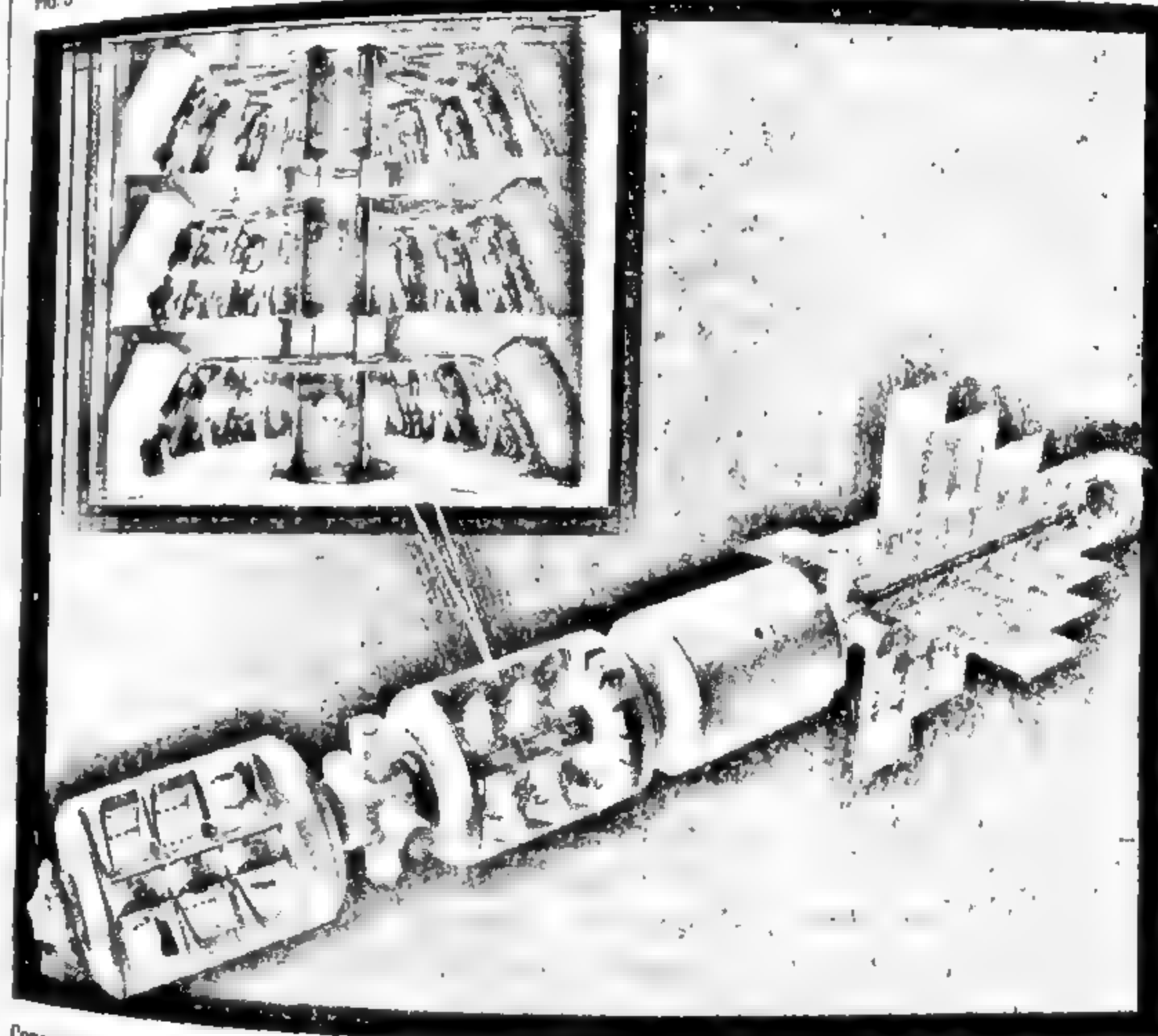
Independientemente de los sofisticados sistemas de propulsión que vayan a emplearse en el futuro, una misión tripulada con destino a los planetas extrasolares requerirá décadas, o incluso siglos, para su ejecución, lo que se traduciría en un desmesurado consumo en términos de soporte vital, seguramente incompatibles con las capacidades de los propios vehículos espaciales. La implementación de sistemas que garanticen el transporte de seres humanos evitando tales consumos parece ser el único método viable.

La animación suspendida

La animación suspendida o hibernación podría constituir la solución al problema de la supervivencia humana en misiones más allá de nuestro sistema solar, aunque su puesta en práctica podría tener lugar en vuelos con destinos más cercanos, como Marte.

La compañía estadounidense SpaceWorks Enterprises está trabajando en un proyecto orientado al envío al planeta rojo de una misión humana, cuya tripulación permanecería la mayor parte del viaje en hibernación (figura 3). En esencia, se trata de

FIG. 3



Concepto de vehículo espacial diseñado por SpaceWorks Enterprises Inc., destinado a misiones humanas al planeta Marte. La tripulación permanecería en estado de hibernación durante la mayor parte del vuelo.

Un mundo en el que los humanos y los robots coexistan es un mundo de enormes posibilidades, para lo bueno y para lo malo.

AMY MICHELLE DeBAETS

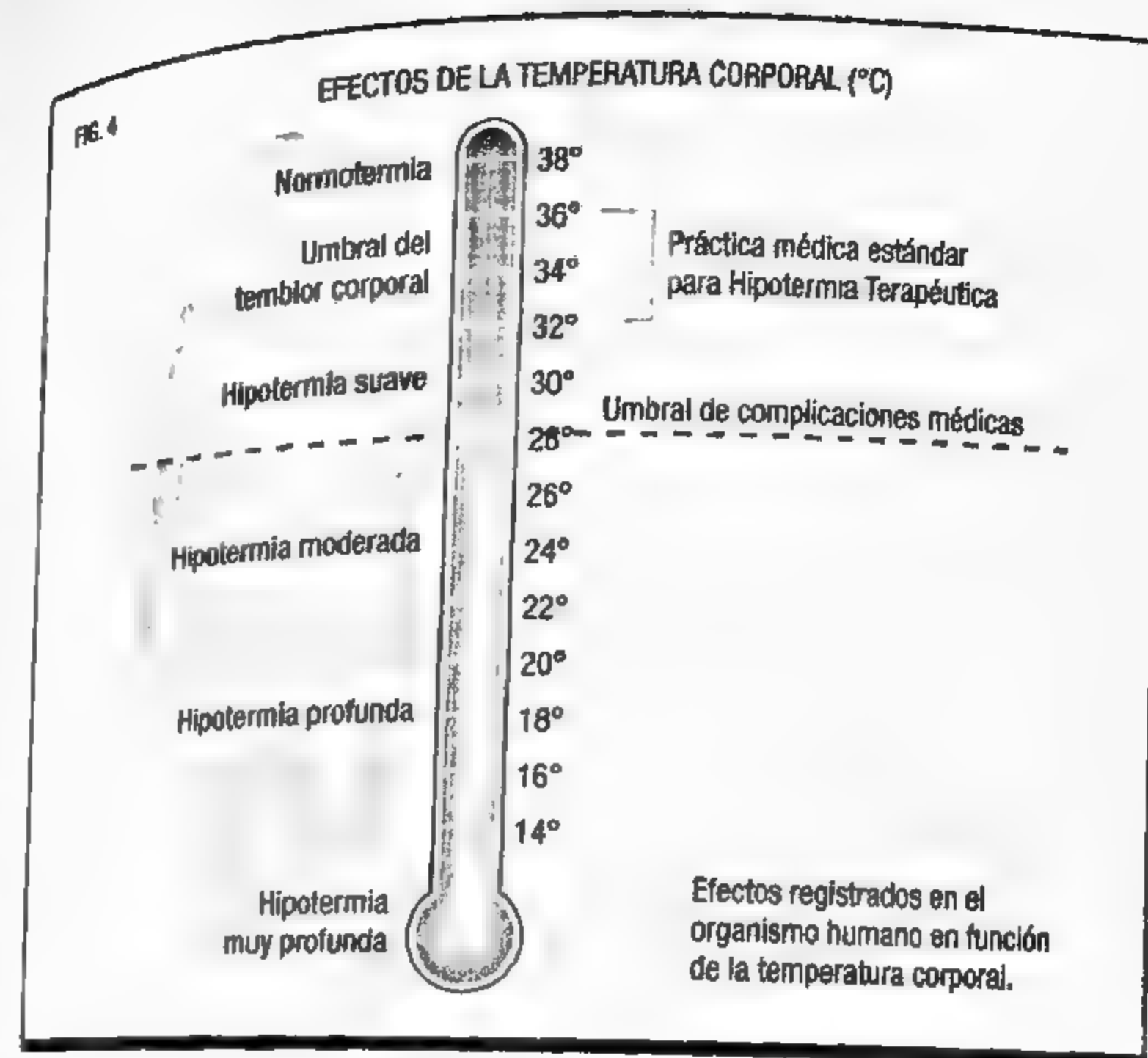
los alimentos y también de utilizarlos para construir proteínas y otras moléculas de nuestro cuerpo. Esta técnica redundaría en una disminución considerable del número de consumibles necesarios a bordo y en la reducción del volumen presurizado que, de lo contrario, sería necesario en términos de habitabilidad para los tripulantes, haciendo innecesaria la instalación de infraestructuras tales como cocinas y útiles alimentarios.

La hibernación, además, eliminaría en los astronautas el impacto psicológico que conllevan los vuelos espaciales de larga duración, y paliaría los problemas médicos relacionados con la exposición prolongada a la microgravedad, prescindiendo, por tanto, de la introducción de equipamientos destinados al ejercicio físico y al entretenimiento.

Aún no está claro si los humanos podemos someternos a un estado de animación suspendida, dado que el proceso implica un importante descenso de la temperatura corporal, hasta alcanzar un estado de hipotermia profunda (figura 4). Según el Dr. Cheng Chi Lee, del Departamento de Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad de Houston (Texas), el uso de inhibidores metabólicos como la 2-desoxiglucosa y el sulfuro de hidrógeno (H_2S), así como de una biomolécula descubierta recientemente en su laboratorio y denominada 5'-adenosina monofosfato (5'-AMP), podría permitir someter a hipotermia profunda a varios tipos de mamíferos, incluidos los humanos. Se trata, aún, de investigaciones incipientes que requieren muchos años para llegar a conclusiones sólidas.

De lograrse, la hibernación supondría un descenso considerable en la cantidad de nutrientes consumidos por la tripula-

someter a los astronautas a un estado de letargo durante la fase de tránsito entre planetas, mediante la introducción de prácticas que actualmente se realizan en el ámbito de la medicina, concretamente en un área llamada hipotermia terapéutica, con el propósito de lograr un equilibrio hipotérmico y, con él, una disminución considerable del metabolismo corporal, esto es, la capacidad de obtener nutrientes de



ción, que sería alimentada por vía parenteral, es decir, intravenosa, mediante una solución rica en lípidos, aminoácidos, glucosa, electrolitos, vitaminas y elementos traza, es decir, todos y cada uno de los nutrientes esenciales para el organismo. La vía parenteral implica el uso de un catéter para suministrar el alimento, que llega directamente al torrente sanguíneo, evitándose así los procesos de ingestión y digestión. El proceso de hibernación sería interrumpido con una elevación suave y continua de la temperatura corporal hasta alcanzar niveles normales (normotermia), situados entre los 36 °C y los 38 °C.

La participación de los robots

En misiones a destinos relativamente cercanos como Marte, las comunicaciones se encuentran sometidas a una importante de-

mora, dado que las ondas de radio, viajando a la velocidad de la luz, tardan en recorrer la distancia entre la Tierra y el planeta rojo una media de 4,3 minutos, tiempo que, como mínimo, se duplica si la transmisión enviada requiere una respuesta. Ello ha obligado a los ingenieros a introducir en los vehículos espaciales con destino a este y a otros cuerpos celestes más distantes un software que les permita reaccionar ante imprevistos, y así no depender excesivamente de los responsables de la misión en los centros de control. En otras palabras, dicha programación está orientada a que las máquinas, dentro de ciertos parámetros, tengan la capacidad de aprender.

Un ejemplo de ello es el software denominado EUROPA, una herramienta de planificación basada en inteligencia artificial, y empleada en la misión Deep Space 1 y en las desempeñadas por los vehículos todoterreno de exploración de Marte de la NASA. Esta herramienta ha permitido reducir hasta nueve veces el tiempo de planificación de actividades de tales misiones. Nuevas herramientas están contribuyendo igualmente a reducir el número de personas necesarias para supervisar y llevar a buen término misiones robóticas con destino a otros planetas. Si bien esta reducción supone una disminución de los costes de cada misión, dicha cualidad se torna defecto en el ámbito laboral.

Muchos de los sistemas de las naves espaciales del futuro estarán basados en la inteligencia artificial, lo que les otorgará la facultad de realizar autodiagnósticos y operaciones de autorreparación, aunque sus limitaciones físicas obligarán a la utilización de robots autónomos para efectuar aquellos trabajos que el propio vehículo no pueda realizar por sí mismo.

La naturaleza es la mejor diseñadora conocida hasta la fecha. Por ese motivo, la robótica tiende a imitar el aspecto y funcionalidad de formas de vida conocidas, una técnica denominada *biomimética*, que se consigue mediante la ingeniería inversa, es decir, el estudio del funcionamiento de tales formas de vida y su posterior replicación. La utilidad de la biomimética en el ámbito de la ingeniería radica en que los organismos biológicos se enfrentan a muchos de los desafíos que deben superar los sistemas diseñados artificialmente.



El robot R5 de la NASA, ■ aspecto antropomorfo. Un paso más en la utilización de androides en el espacio exterior.

EL HOMBRE QUE POPULARIZÓ LOS ROBOTS

Conocido por ser un prolífico escritor de ciencia ficción, Isaac Asimov nació el 2 de enero de 1920 en la localidad rusa de Petrovichi. Cuando contaba tan solo tres años de edad, él y su familia emigraron a Estados Unidos, estableciendo su residencia en Brooklyn, Nueva York. Su primer contacto con la ciencia ficción fue la lectura de relatos publicados en las páginas de los periódicos de la época, una práctica que, en principio, no contaba con la aprobación de su padre, quien creía que aquellas obras contribuían a la putrefacción de la mente. El joven Isaac demostró tener una singular capacidad para el conocimiento, cualidad que le permitió saltarse algunos cursos y graduarse en el instituto con solo quince años. Asimov se graduó en Química por la Universidad de Columbia cuatro años después, y durante su paso por la facultad escribió su primera historia de ciencia ficción. Un año antes de finalizar la carrera, conoció a John Campbell, en aquel entonces editor de la revista *Astounding Science Fiction* («ciencia ficción asombrosa») y uno de los más influyentes de su época, a quien mostró las páginas de la obra que acababa de finalizar. Campbell inmediatamente advirtió el gran potencial de Asimov, iniciándose la que ha sido, hasta la fecha, la colaboración autor-editor más fructífera en el ámbito de la ciencia ficción.



El célebre autor de ciencia ficción Isaac Asimov, en una fotografía tomada en la década de 1970.

Las tres leyes de la robótica

Entre 1940 y 1949, Isaac Asimov publicó un total de nueve relatos en los que los robots desempeñaban un papel destacado. Dichas historias, que fueron compiladas y publicadas conjuntamente al año siguiente bajo el título de *Yo, robot*, exponían los postulados de las que llegaron a denominarse «las tres leyes de la robótica», concebidas por el propio Asimov, que rezan así:

1. Un robot no puede herir a los humanos ni permitir, por inacción, que estos sean heridos.
2. Un robot debe obedecer a los humanos, excepto si sus órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia a menos que esta incurra en un incumplimiento de las leyes primera y segunda.

Estos postulados están cobrando cada vez más importancia, especialmente dentro de aquellos ámbitos ligados a la inteligencia artificial y a la ética robótica.

El legado de Asimov

Isaac Asimov falleció el 6 de abril de 1992 a causa del sida, tras ser contagiado con el VIH durante una transfusión de sangre practicada nueve años antes. Su legado literario abarca más de doscientas obras de ciencia ficción, lo que le convierte en uno de los autores más prolíficos de todos los tiempos.

A la derecha, portada del número de la revista *Galaxy* en cuyas páginas se publicó la novela *Bóvedas de acero*, de Isaac Asimov.

Galaxy

SCIENCE FICTION

OCTOBER 1953

354

ANC



Cabe pensar que, dadas las particularidades del medio espacial, muy agresivo para cualquier forma de vida compleja, no parece la mejor idea emplear la biomimética en el diseño de robots. Sin embargo, existen organismos que exhiben una serie de características que son de gran utilidad en un ambiente espacial, como, por ejemplo, la autonomía, la robustez, el escaso consumo de recursos, la adaptabilidad y la autorreparación. En este sentido, se está trabajando ya en sistemas robóticos inspirados en varios animales, entre ellos los geos, un grupo de reptiles —al que pertenecen, por ejemplo, las salamandras— que constituye el ejemplo ideal, dado que son capaces de caminar y correr con agilidad sobre superficies verticales, e incluso patas arriba, gracias, entre otras cosas, a un sistema de adhesión cuyo uso en el espacio sería de gran utilidad en multitud de áreas.

La tecnología está recorriendo un camino que culminará, dentro de no muchos años, con la producción en serie de «personas artificiales» o androides, robots con apariencia humanoide (véase la fotografía de la página 117) cuya programación les permitirá interactuar en sociedad y adquirir conocimientos a través de la experiencia. Su participación en vuelos tripulados, especialmente en aquellos en los que los humanos deban someterse a hibernación, es crítica, dado que en ellos recaerá la responsabilidad de mantener el funcionamiento de los sistemas principales de a bordo, y de reaccionar con presteza ante cualquier tipo de incidencias. Su comportamiento estará sujeto a las denominadas «leyes de la robótica», promulgadas por el popular escritor de ciencia ficción Isaac Asimov, un conjunto de normas destinadas a proteger a los seres humanos frente a posibles rebeliones por parte de los robots.

La participación de robots en vuelos espaciales humanos, que en la antigüedad estaba enmarcada exclusivamente en la ciencia ficción, es hoy una realidad tangible que está sentando las bases de empresas cada vez más ambiciosas, y será de vital importancia en el momento en que nuestra especie abandone definitivamente nuestro planeta para adentrarse en el oscuro vacío del espacio, rumbo a otros mundos ajenos a nuestro sistema solar.

CAPÍTULO 7

Un posible encuentro extraterrestre

Si la especie humana logra emprender el largo viaje a través del océano cósmico rumbo a otros sistemas solares, cabe la posibilidad, aunque remota, de un eventual encuentro con otras formas de vida, desde simples microorganismos a civilizaciones inteligentes mucho más avanzadas que la nuestra.

El universo es un lugar poblado por cientos de miles de millones de galaxias, que están formadas, a su vez, por cientos de miles de millones de estrellas. El popular astrofísico y comunicador científico Carl Sagan decía que en el firmamento existen más soles que granos de arena en todas las playas del planeta Tierra. En el segundo capítulo explicábamos que, estadísticamente, los científicos creen que los exoplanetas similares a la Tierra y situados en las regiones habitables de estrellas análogas a nuestro Sol podrían contarse por billones. No es, entonces, descabellado pensar que un mínimo porcentaje de esos billones de planetas puedan estar habitados por algún tipo de forma de vida, desde microorganismos unicelulares a seres complejos, sin descartar incluso la existencia de civilizaciones dotadas de cierto desarrollo científico y tecnológico.

Como exploraremos con más detalle en páginas siguientes, la vida, tal y como la conocemos, tiene un gran potencial de adaptación a ambientes que, en principio, podríamos considerar incompatibles con ella. No han transcurrido demasiados años desde el descubrimiento de los llamados *extremófilos*, organismos capaces de desarrollarse perfectamente en entornos muy hostiles,

como ambientes hipersalinos, dominados por temperaturas muy bajas o muy altas, e incluso en presencia de altos niveles de radiación que serían mortales para cualquier ser complejo conocido.

Por otra parte, se ha demostrado que ciertos microorganismos son capaces de sobrevivir al ambiente de vacío del espacio, una

Encontrar otras formas de vida en el universo es solo cuestión de tiempo.

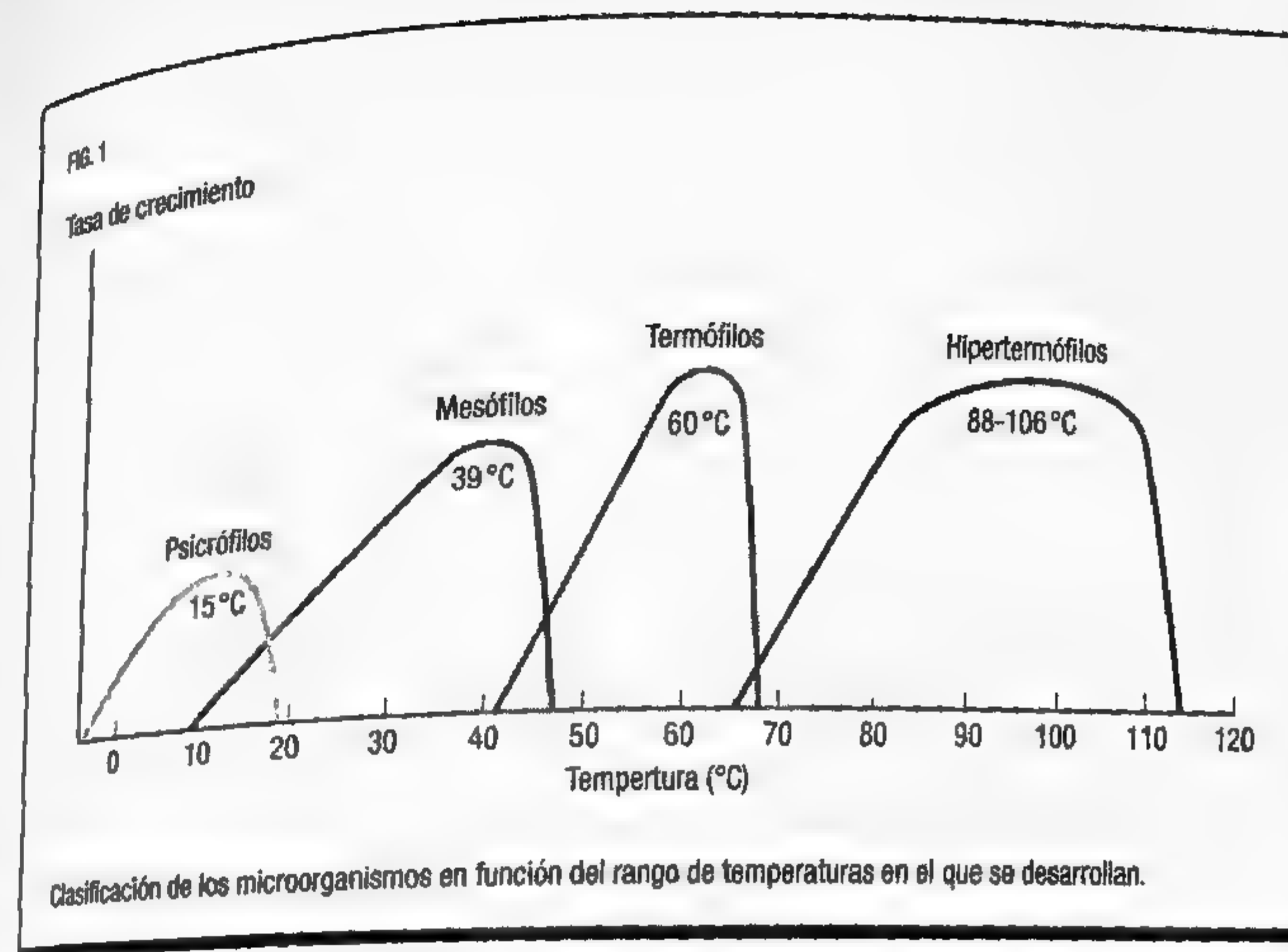
FRANK DRAKE

cualidad que refuerza los postulados de la teoría de la panspermia, surgida a finales del siglo XIX y ampliamente aceptada hoy en día por la comunidad científica. Dicha teoría, que tuvo como firmes defensores al científico sueco Svante Arrhenius y al británico William Thomson, basa su argumento en que la vida pudo no haber surgido en nuestro planeta, sino haber llegado a la Tierra «a bordo» de meteoritos y cometas. Del mismo modo que habría llegado a la Tierra, también sería posible que se hubiera propagado a lo largo y ancho del vasto universo, asentándose en multitud de planetas y lunas extrasolares.

VIDA EN AMBIENTES AGRESIVOS

El término «extremófilo» tiene ciertas connotaciones antropocéntricas, dado que define a aquellos seres vivos —generalmente microscópicos— que son capaces de adaptarse a unas situaciones ambientales agresivas desde el punto de vista humano. Contemplado a la inversa, tales organismos podrían considerar igualmente extremófila a nuestra especie, dado que somos capaces de vivir y desarrollarnos en ambientes que, para ellos, serían mortales.

Existe una gran variedad de organismos en el planeta Tierra que sobreviven perfectamente en ambientes adversos, y que son objeto de estudio por parte de los astrobiólogos, cuyo trabajo se centra en determinar las posibilidades de que exista vida más allá de la atmósfera terrestre. Algunos de estos microorganismos, los llamados *termófilos*, viven en condiciones caracterizadas por las altas temperaturas, y otros, por el contrario, viven en ambientes de bajas temperaturas, los *psicrófilos* (figura 1).



Un infierno como hogar

Los termófilos desarrollan su vida en lugares donde predominan las altas temperaturas, como chimeneas volcánicas submarinas o aguas termales como las halladas en el Parque Nacional de Yellowstone, Estados Unidos. El rango de temperaturas a las que viven se sitúa generalmente entre los 45 °C y los 70 °C, aunque puede alcanzar temperaturas superiores. El umbral inferior de supervivencia de estos organismos se ubica en torno a los 20 °C.

Dentro de este grupo se encuentran los denominados *hipertermófilos*, cuya existencia fue descubierta en el año 1960 en Yellowstone, y de los que se conocen, al menos, cincuenta tipos. Uno de ellos fue puesto a prueba en un autoclave (instrumento empleado para la esterilización de herramientas quirúrgicas), elevando la temperatura hasta los 121 °C, y se comprobó que en ese ambiente térmico es capaz de doblar su población en tan solo 24 horas. Este microorganismo es conocido como cepa 121,

correspondiendo el número a la temperatura a la que se sometió en el experimento. Aunque puedan parecer cotas térmicas muy elevadas, existen evidencias que apuntan a la existencia de otros organismos capaces de vivir en el entorno de chimeneas volcánicas submarinas con un alto contenido en sulfuros y temperaturas superiores a los 200 °C. En situaciones normales, el ADN —la molécula que alberga los genes— y otras moléculas orgánicas se descomponen a partir de los 150 °C, pero estos microorganismos logran sobrevivir a temperaturas mayores porque ingieren y/o producen sales que mejoran la estabilidad de la cadena de ADN, además de estar dotadas de proteínas capaces de enrollarla considerablemente y proporcionarle así una mayor estabilidad frente a temperaturas muy elevadas.

Viviendo en situaciones gélidas

La versión opuesta de los termófilos la ofrecen los psicrófilos, capaces de vivir y reproducirse a temperaturas medias de 15°C, aunque existen algunas especies que logran sobrevivir en rangos inferiores a 0°C y próximos a los 40°C. Suelen localizarse en lugares donde predomina el hielo, como el *permafrost* (capa de suelo permanentemente congelado, característico de las zonas muy frías) y las regiones alpinas, así como en aguas árticas y muy profundas, glaciares y otros ambientes análogos.

Muchos psicrófilos son, además, poliextremófilos, es decir, son capaces de vivir en situaciones extremas variadas. Algunos predominan en ambientes de alta presión, como las aguas árticas muy profundas; en medios con elevadas concentraciones de sal, como las salinas, y en lugares expuestos a altos niveles de radiación ultravioleta, como las superficies polares y los glaciares. Ciertos tipos de psicrófilos han sido hallados igualmente en desiertos árticos, caracterizados por la escasez de agua y nutrientes.

En una expedición realizada a tierras de Fox, en Fairbanks (Alaska), un equipo de científicos de la NASA liderado por el astrobiólogo Richard Hoover tomó varias muestras de hielo en un túnel de permafrost, las cuales databan del Pleistoceno (en tor-

El «OSITO ALIENÍGENA»

Los tardígrados («caminantes de paso lento», en latín) son conocidos popularmente como ositos de agua, osos espaciales o cerdos del musgo. Se trata de un grupo de invertebrados microscópicos cuya longitud media se sitúa en torno a los 500 µm. A tenor de la edad de algunos fósiles hallados, su origen data del período Cámbrico, en torno a los 530 millones de años. En la actualidad, los tardígrados se hallan distribuidos por todo el planeta, dadas sus particulares cualidades para adaptarse a ambientes variables.

Un superviviente por definición

Este pequeño animal se caracteriza por una gran resistencia a condiciones extremas que serían mortales para casi todas las formas de vida conocidas. Son capaces de soportar temperaturas mínimas de -272 °C (un grado Celsius por encima del cero absoluto, la temperatura mínima posible, -273,15°C) y máximas de 150 °C, aunque solo durante unos pocos minutos. Además, sobreviven a presiones que van desde cero (vacío absoluto) hasta los 1200 bares, es decir mil doscientas veces la presión media de nuestra atmósfera al nivel del mar. En experimentos realizados en misiones espaciales, como la ruso-europea Foton-M3 en septiembre de 2007, se pudo determinar que estos pequeños organismos son capaces de soportar el vacío del espacio y sobrevivir a altas dosis de radiación ultravioleta en periodos de diez días, motivo por el cual han sido objeto de estudio a bordo de la Estación Espacial Internacional. No pueden considerarse extremófilos porque, aunque soportan las duras condiciones descritas, estas no constituyen su ambiente natural.

Un animal capaz de reparar su ADN

Los tardígrados son capaces de soportar una cantidad de radiación ionizante (que puede romper la cadena de ADN) mil veces superior a la de la mayoría de los animales conocidos. Las primeras investigaciones apuntaban a que el motivo se relacionaba con el estado de deshidratación propio de estos animales, que implica unos niveles muy bajos de reactivos que puedan agravar los efectos de la radiación. Sin embargo, tal resistencia también fue advertida en especímenes hidratados, lo que induce a los científicos a pensar que este tipo de animales puede reparar su ADN gracias a una proteína que han denominado Dsup (abreviatura, en inglés, de «supresor de daños»).

Imagen de un tardígrado tomada con un microscopio electrónico.



no a los 32 000 años de antigüedad) y contenían ejemplares vivos de una especie de bacteria psicrófila llamada *Carnobacterium pleistocenium* de cuya existencia no se tenía constancia hasta entonces. Este hallazgo demuestra que ciertos tipos de microorganismos son capaces de sobrevivir en el hielo durante periodos geológicos, de decenas de miles de años, lo que abre las puertas a la posibilidad de que bacterias similares puedan habitar otros cuerpos celestes en los que predominen ambientes similares.

CIVILIZACIONES INTELIGENTES

¿Estamos solos en el universo? Esta es una de las preguntas que más veces se ha formulado el ser humano a lo largo de los siglos, al dirigir su mirada al firmamento en noches estrelladas. Hasta ahora hemos abordado la existencia de microorganismos capaces de sobrevivir a ambientes extremos, muchos de los cuales se dan en otros cuerpos celestes del sistema solar, como nuestro vecino Marte o en lunas como Titán y Europa, satélites de Saturno y Júpiter, respectivamente. Pero ¿existe vida inteligente más allá de nuestro planeta? Por ahora, solo podemos dar una respuesta parcial a esa pregunta: al menos en nuestro sistema solar, no existe vida inteligente aparte de la de la Tierra. Esa certeza decrece conforme nos adentramos en el espacio profundo. Hoy en día sabemos que existen multitud de planetas, algunos de los cuales pueden reunir las condiciones para que la vida surja y se desarrolle.

La búsqueda de inteligencias extraterrestres ha tenido como referencia a nuestra propia especie. Los humanos tenemos una determinada apariencia, y podemos clasificarnos en diversas razas, cada una con sus rasgos definitorios. Pero emplear esa referencia en la búsqueda de civilizaciones más allá de nuestro sistema solar podría no ser la mejor opción. Nuestro planeta reúne unas características muy particulares, como una inclinación concreta de su eje, que permite la generación de estaciones climáticas, y la presencia de una luna, que influye en la referida inclinación axial de la Tierra. La tercera característica es la especie dominante que

EL HOMBRE QUE LLEVÓ EL ESPACIO AL GRAN PÚBLICO

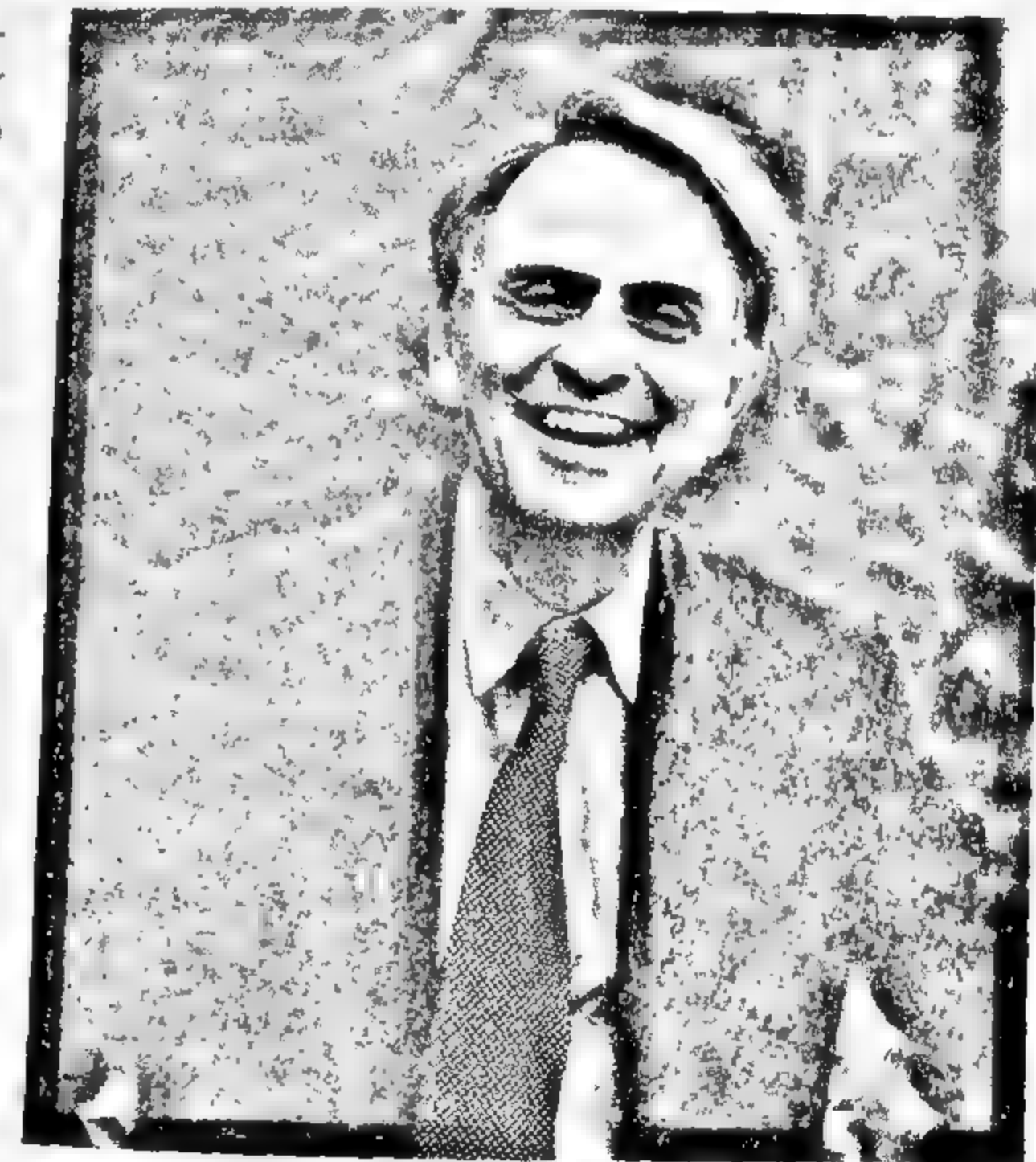
Carl Sagan nació en Nueva York, el 9 de noviembre de 1934. Su temprana curiosidad por la naturaleza y el origen de la vida le condujo a dirigir la mirada al espacio exterior.

Impulsor de la exploración planetaria

Sagan participó en multitud de programas espaciales de la NASA, destinados a la exploración de los principales planetas del sistema solar, destacando los Mariner, Viking, Pioneer y Voyager. Sagan pensaba que las misiones robóticas eran mejor alternativa que las tripuladas en la exploración planetaria. Sagan, al igual que Frank Drake, fue un firme defensor de programas científicos como el SETI (acrónimo, en inglés, de «búsqueda de inteligencia extraterrestre»).

Desvelando las maravillas del universo al público

En 1980 fue coautor y presentador de la serie de divulgación científica *Cosmos: un viaje personal*, que se convirtió en el programa de televisión más visto de la historia, con quinientos millones de espectadores en más de sesenta países. La serie se acompañó de un libro con el mismo título. Estas obras permitieron a la sociedad conocer, con un lenguaje cercano y simple, las maravillas que esconde nuestro universo, además de inspirar a toda una generación de científicos e ingenieros. Sagan también mostró en sus obras su preocupación por la naturaleza y el medioambiente, y por el uso que las potencias nucleares podían hacer de sus respectivos arsenales, lo que lo convirtió, además de en un magnífico divulgador, en un firme defensor del ecologismo.



El astrónomo y divulgador Carl Sagan fotografiado en 1994.

vive en ella, la humana, que debe su aspecto y comportamiento, por un lado a un acontecimiento que tuvo lugar hace 66 millones de años, el impacto de un gran asteroide de 10 kilómetros de diámetro, que propició la extinción de más de tres cuartas partes de las formas de vida que en aquel entonces poblaban la Tierra, entre ellas la predominante: los dinosaurios. Ese cataclismo provocó que los mamíferos tomaran el relevo de los dinosaurios, y que, con el transcurso de decenas de millones de años, por azares y «errores» en la transmisión genética que dieron lugar a ciertas mutaciones, surgiera la especie humana, cuya facultad de aprendizaje la convirtió en la predominante sobre cualquier otra forma de vida, para bien o para mal.

¿Qué posibilidades hay de que existan otros planetas en los que se hayan dado todas y cada una de esas casualidades geológicas y biológicas? Aún no existe respuesta a esa pregunta, ni se ha hallado planeta alguno que guarde esos paralelismos con la Tierra. La vida inteligente en otras partes del universo, seguramente, tendrá muchas diferencias con los seres humanos, no solamente físicas, sino también culturales. De su desarrollo tecnológico depende que podamos, en algún momento, detectar su presencia, y viceversa.

¿Es la Tierra un planeta habitado por seres inteligentes?

A primera vista, la pregunta parece un tanto irónica. Sin embargo, responder a esta cuestión era parte de un experimento realizado en la misión Galileo de la NASA, cuyo propósito principal era estudiar Júpiter y su sistema de lunas. Desplegada el 18 de octubre de 1989 desde la bodega de carga del transbordador espacial Atlantis en el marco de la misión STS-34, la sonda Galileo realizó tres aproximaciones planetarias antes de llegar a su destino, dos a Venus y una a la Tierra, con el propósito de aprovechar el campo gravitatorio de estos cuerpos y ganar así velocidad.

El 8 de diciembre de 1990, la nave efectuó la aproximación a nuestro planeta, empleando sus instrumentos para intentar determinar si la Tierra era un planeta que albergaba vida. La Ga-

lileo encontró abundantes cantidades de oxígeno; un pigmento ampliamente distribuido por la superficie del planeta con una aguda absorción en el rojo —lo que significa que refleja mucho verde—, y cantidades de metano atmosférico en un desequilibrio tal que no podía atribuirse exclusivamente a la actividad volcánica. Todos esos datos apuntaban a que, efectivamente, la Tierra albergaba algún tipo de forma de vida. Las observaciones realizadas en frecuencias de radio detectaron la presencia de un tipo de transmisiones cuya emisión, sin lugar a dudas, tenía un origen inteligente. Este experimento sentó las bases para la búsqueda de vida extraterrestre mediante ingenios enviados al espacio exterior.

La primera retransmisión de radio realizada a gran escala (para más de 50 países) tuvo lugar con motivo de la celebración de los Juegos Olímpicos de Berlín en el año 1936. Una significativa parte de esas emisiones, y de las que han tenido lugar hasta nuestros días, abandonaron nuestro planeta y se adentraron en el espacio a la velocidad de la luz. En 1945, una pequeña porción de aquella retransmisión alcanzó la estrella Próxima Centauri. Desde entonces, nuestras emisiones de radio, aunque muy débiles, se han extendido en casi ochenta años-luz a la redonda, un rango en el que ya se han descubierto planetas extrasolares situados en regiones habitables. Si existiera alguna civilización tecnológicamente avanzada en alguno de ellos, esta podría haber comenzado a recibir evidencias de nuestra existencia.

UN EVENTUAL CONTACTO DURANTE EL VIAJE HACIA LAS ESTRELLAS

No podemos descartar, en absoluto, que, llegado el momento de emprender el viaje a otros sistemas solares, bien durante el trayecto, bien a la llegada al planeta de destino, la especie humana

Este momento es único en nuestra historia, en la historia de cualquier civilización: el momento de la adquisición de la tecnología. El momento en el que el contacto llega a ser posible.

ELLIE ARROWAY (JODIE FOSTER), *CONTACT*

deba enfrentarse a la posibilidad de entrar en contacto con otras formas de vida.

Diez años después de que el primer satélite artificial de la historia, el soviético Sputnik 1, fuera lanzado a la órbita terrestre, entró en vigor el llamado «Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluida la Luna y otros cuerpos celestes», aprobado por la Asamblea General de la ONU el 19 de diciembre de 1966 y cuya entrada en vigor tuvo lugar en 1967. Con la introducción de actualizaciones y revisiones sucesivas, el tratado vela porque todas las actividades realizadas más allá de la atmósfera terrestre no contravengan ningún acuerdo y no sean susceptibles de conflicto internacional. Aunque aborda cuestiones relacionadas con materiales de origen extraterrestre, no contempla la posibilidad de contacto con formas de vida alienígena. No obstante, existen organizaciones como el Instituto SETI (acrónimo, en inglés, de «búsqueda de vida extraterrestre inteligente») y la Academia Internacional de Astronáutica (IAA) que, con el apoyo del Instituto Internacional de Legislación Espacial, han desarrollado ciertos protocolos en caso de detectar la existencia de civilizaciones extraterrestres.

Conocido como *Declaration of Principles Concerning Activities Following the Detection of Extraterrestrial Intelligence* («Declaración de principios sobre las actividades posteriores a la detección de inteligencia extraterrestre»), este texto conforma el denominado protocolo de posdetección, que define los pasos que han de seguirse en lo tocante a la detección, análisis, verificación, anuncio y respuesta ante señales cuyo origen se confirme de naturaleza inteligente y extraterrestre. El protocolo, aunque no ha sido aún adoptado por organismos gubernamentales, establece las directrices que estos deberían seguir ante un eventual contacto alienígena.

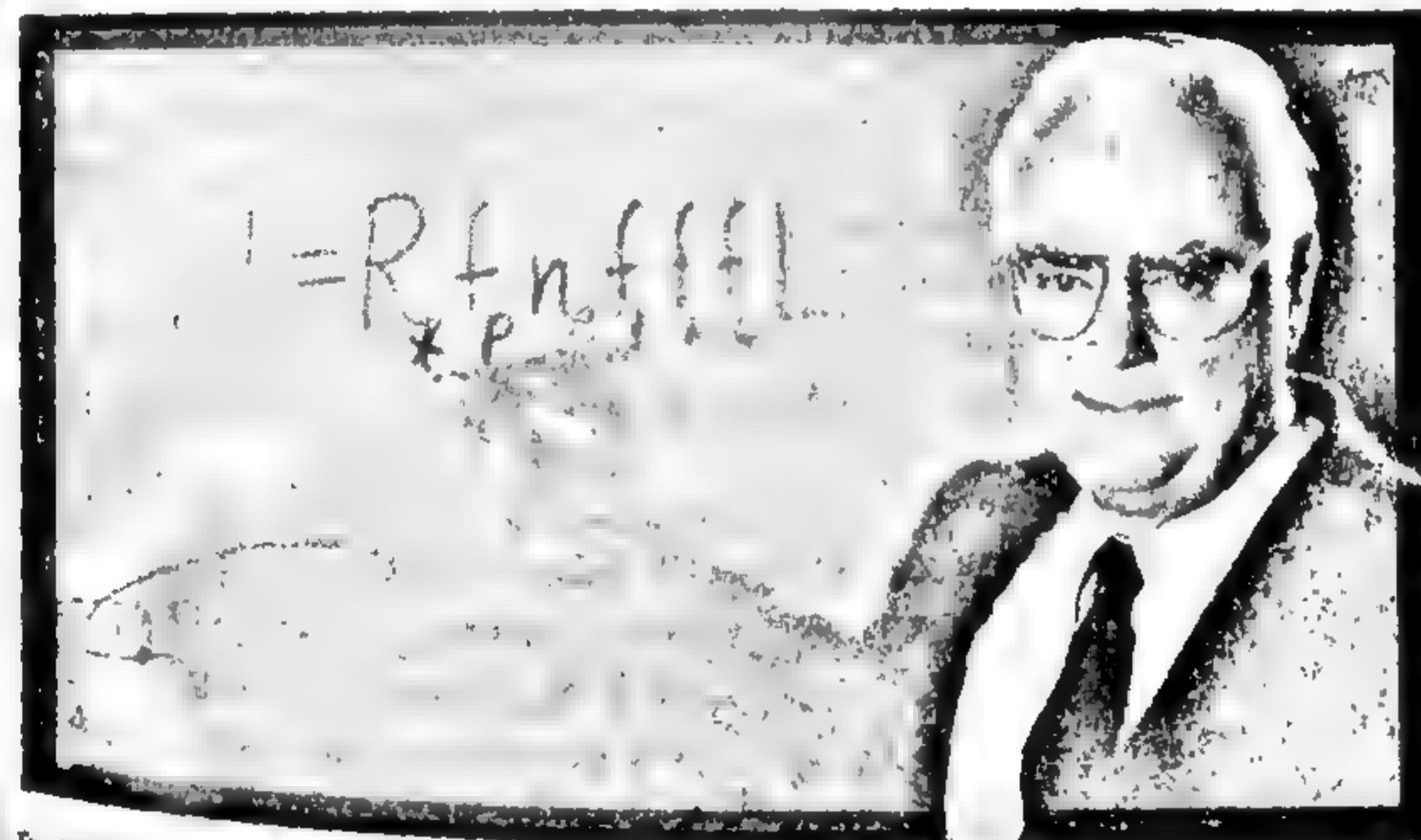
Antes de que la especie humana emprenda el viaje hacia las estrellas, deberá contar con un tratado que contemple con detalle el contacto con entidades extraterrestres y un protocolo en caso de que, efectivamente, dicho contacto tenga lugar. Asimismo, el tratado deberá dar respuesta satisfactoria ante eventualidades

¿CUÁNTAS CIVILIZACIONES TECNOLÓGICAS EXISTEN EN EL UNIVERSO?

En 1961, un año después de abandonar el Proyecto Ozma —una iniciativa basada en emplear ondas de radio con el propósito de intentar captar señales de origen extraterrestre—, el astrónomo estadounidense Frank Drake desarrolló una ecuación que, de manera estadística, definía el número de civilizaciones extraterrestres capaces de ser detectadas en el espacio. Conocida con el transcurso de los años como la «ecuación de Drake», su expresión matemática es la siguiente:

$$N = R^* \cdot f_p \cdot n_p \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

donde N hace referencia al número de civilizaciones en la Vía Láctea cuyas emisiones electromagnéticas son detectables; R^* indica la tasa de formación de estrellas apropiadas para el desarrollo de vida inteligente; f_p expresa la fracción de aquellas estrellas dotadas de sistemas planetarios, n_p es el número de planetas, por sistema solar, con un ambiente adecuado para la vida; f_i hace referencia a la fracción de planetas apropiados en los que, realmente, surge la vida; f_c indica la fracción de planetas que pueden albergar vida y en los cuales emergen civilizaciones inteligentes; L expresa la fracción de civilizaciones que desarrollan una tecnología que emite señales detectables desde el espacio, y L hace referencia al tiempo que tales civilizaciones llevan emitiendo dichas señales detectables. Según el optimismo con el que se estime cada parámetro, el resultado de la ecuación va desde diez civilizaciones extraterrestres detectables por año hasta una sola en millones de años.



Frank Drake, creador de la fórmula que lleva su nombre, y que determina la posibilidad de existencia de civilizaciones tecnológicamente avanzadas.

diversas, entre ellas que los planetas elegidos como destino para la especie humana se encuentren habitados por tales entidades, gentes. En este sentido, un precedente cercano podría darse en nuestro propio sistema solar, concretamente en Marte. Si finalmente se demostrase que el planeta se encuentra habitado por microorganismos, ¿sería legítimo y/o ético someterlo a un proceso de terraformación, el cual podría suponer el exterminio de tales microorganismos? Desde cierta perspectiva, una actuación de esta naturaleza contravendría algunos acuerdos en el marco del tratado de Naciones Unidas actualmente en vigor.

Por otra parte, un contacto con civilizaciones extraterrestres podría conllevar ciertos riesgos para ambas partes, entre ellos el contagio de enfermedades por transmisión de organismos patógenos, la agresión y el intento de aniquilación, o bien unilateral o bien mutua. ¿Cómo respondería el ser humano en caso de aterrizar en planetas extrasolares habitados por civilizaciones tecnológicamente inferiores? ¿Qué ocurriría si, por el contrario, tales civilizaciones fueran superiores a la nuestra? Todas estas incógnitas hacen necesaria una legislación que contemple estos y otros escenarios que podrían darse en el viaje más allá de nuestro sistema solar.

CAPÍTULO 8

El futuro de nuestra especie

Las misiones con destino a otros sistemas solares precisarán de generaciones enteras aunando esfuerzos para su consecución. Quizá el mayor desafío al que se enfrente la humanidad para viajar a las estrellas no sea científico, tecnológico ni económico, sino moral. Se antoja necesario un cambio de mentalidad a escala global para lograr tan ambiciosa empresa.

Por lo general, la idea de la migración a otros sistemas solares está asociada a un acontecimiento directamente ligado a la extinción de la vida: la muerte del Sol, un evento que, de acuerdo con los estudios realizados en el campo de la heliofísica, tendrá lugar dentro de unos cinco mil millones de años. Sin embargo, existen otros muchos fenómenos que pueden desencadenar la extinción de la vida en la Tierra y obligar a nuestra especie a abandonar el planeta definitivamente, siendo uno de los más conocidos el impacto de grandes asteroides. Este tipo de acontecimientos se ha dado con cierta frecuencia en nuestro pasado, constituyendo uno de sus máximos exponentes el llamado evento de Chicxulub, la colisión, hace 66 millones de años, de un asteroide de 10 km de diámetro sobre la región que hoy ocupa la península de Yucatán (México). El impacto provocó un gigantesco cráter de más de 200 km de diámetro y la extinción de cerca de tres cuartas partes de las formas de vida que en aquel entonces poblaban nuestro planeta, entre ellas los dinosaurios.

En un pasado más remoto se dieron otros acontecimientos similares que generaron aún mayor destrucción, como la colisión de asteroides próximos a los mil kilómetros de diámetro. Aquellos

impactos liberaron tal cantidad de energía (sobre todo térmica), que la superficie de la Tierra quedó completamente esterilizada.

Otros de los eventos cósmicos que pueden sembrar la muerte sobre la faz de la Tierra son los estallidos de rayos gamma, conocidos por su sigla inglesa, GRB. Considerados los fenómenos más destructivos del universo conocido, tienen lugar como consecuencia de la explosión de estrellas masivas que se encuentran en el final de sus vidas, provocando la formación de agujeros negros que emiten, de manera direccional, radiación gamma al espacio exterior. Un GRB orientado hacia la Tierra provocaría, a su llegada, la destrucción total de la atmósfera, dejando a nuestro planeta totalmente expuesto al medio espacial y a la intensa radiación emitida por el Sol. No habría posibilidad alguna de sobrevivir a un evento de tales características.

«Me he convertido en la muerte,
la destructora de mundos.»

ROBERT OPPENHEIMER, TRAS LA PRIMERA
DETONACIÓN NUCLEAR REALIZADA POR EE. UU.
EN EL DESIERTO DE NEVADA

Existen otros riesgos para la vida en la Tierra que no proceden del espacio exterior. Tienen su origen en nuestro propio planeta y podrían obligar a la especie humana a migrar a otros cuerpos celestes mucho antes de la muerte del Sol, del eventual impacto de un asteroide o de la llegada de un GRB. Esos riesgos están generados por el propio ser humano, cuyo potencial destructivo ha quedado demostrado en las numerosas contiendas bélicas acaecidas desde el amanecer de nuestra especie. Las detonaciones de ingenios nucleares como los lanzados sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki en 1945, proporcionan una idea clara de nuestra capacidad destructora.

Por otra parte, el mal uso de la tecnología está desencadenando una amenaza latente, el cambio climático a escala planetaria, que se está viendo precedido por un aumento de las temperaturas globales provocado por las ingentes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera terrestre. La solución a esta última amenaza es conocida y existen mecanismos para revertirla, aunque las medidas para llegar a ella son relativamente incómodas y deben adoptarse colectivamente,

lo que las hace impopulares, especialmente en el ámbito industrial.

Se trata, en definitiva, de una empresa de gran envergadura y que deberá contar con la participación de varias generaciones. Viajar a otros sistemas solares es una iniciativa igualmente ambiciosa para cuya consecución se antoja inevitable el trabajo en equipo entre diferentes generaciones. Si nuestra especie prospera y finalmente es capaz de adoptar esas medidas y cooperar con éxito, la presencia humana más allá de nuestro sistema solar tendrá más posibilidades de materializarse en el futuro.

LA MUERTE DEL SOL

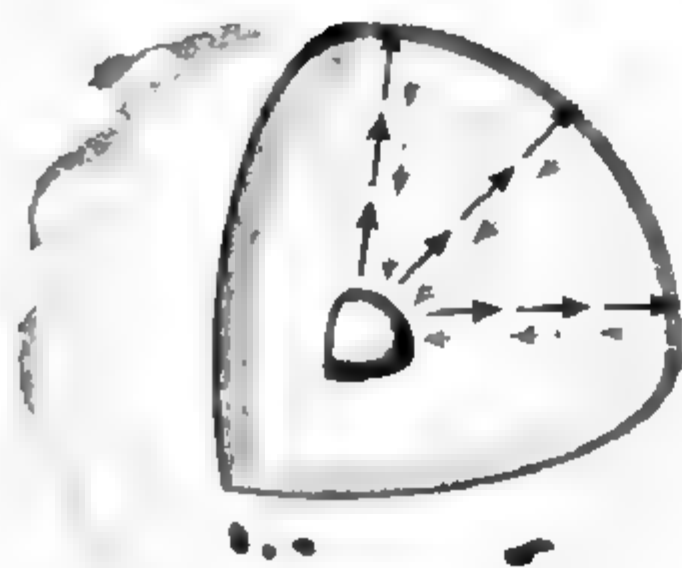
Muchas novelas y películas de ciencia ficción han abordado la muerte de nuestra estrella y los nefastos efectos que ello tendría para nuestro planeta. Sin embargo, y dado que la muerte es una consecuencia directa de la vida, llegará un día en el que el Sol dejará de existir tal y como lo conocemos. Experimentará una transformación tan profunda que sus efectos serán visibles a decenas de miles de años-luz de distancia.

Nuestro Sol, al igual que el resto de estrellas que pueblan el universo, se encuentra en lo que se denomina *equilibrio hidrostático*, que consiste en que las presiones internas, que tienden a que la estrella se expanda, se ven neutralizadas por la fuerza de gravedad generada por su propia masa (figura 1). Pero este equilibrio no es eterno.

El Sol «se nutre» de hidrógeno que, mediante reacciones de fusión nuclear, se transforma en helio en el centro de nuestra estrella (primer paso de la figura 2). El helio producido por esas reacciones es más denso que el hidrógeno, por lo que la mezcla de este último y el helio en el núcleo se hace paulatinamente más densa, lo que redundará en un aumento de la presión y, con ello, en que las reacciones nucleares se produzcan cada vez a mayores temperaturas. La consecuencia directa de este proceso es que el Sol emite más luz. Los científicos calculan que en los primeros momentos tras la formación de nuestra estrella, su brillo era un

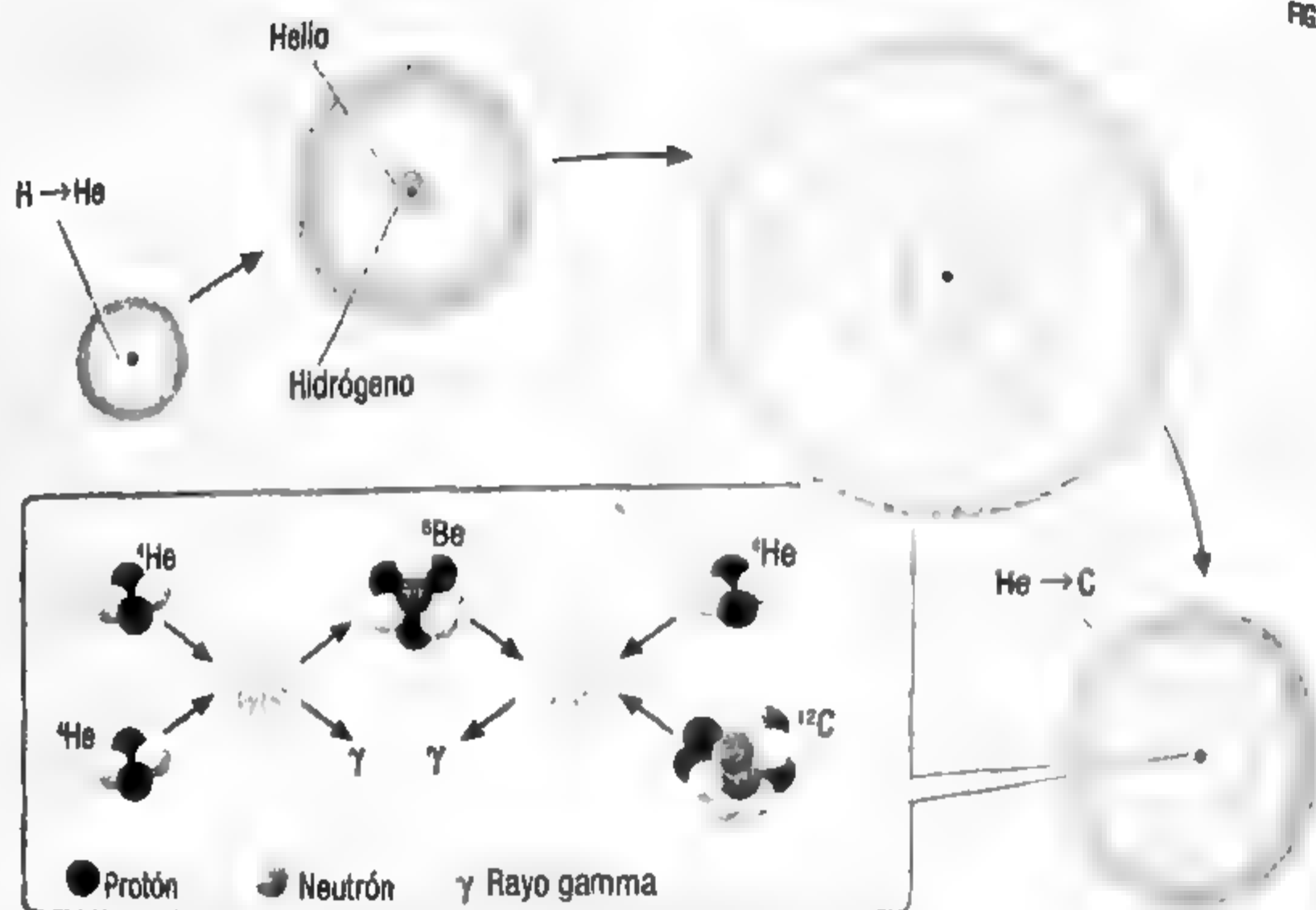
FIG. 1

Presión
Gravedad



El equilibrio hidrostático de las estrellas: las presiones internas quedan compensadas por la gravedad.

FIG. 2



Etapas de la evolución estelar. Las reacciones de fusión nuclear aumentan el tamaño y la temperatura de la estrella. En las etapas finales, el helio comienza a transformarse en carbono mediante una reacción nuclear conocida como triple alfa, que se representa en el recuadro.

30% inferior al actual, y las estimaciones apuntan a que, dentro de 4800 millones de años, este se habrá incrementado en un 67%. En los siguientes 1600 millones de años, la luminosidad del astro rey

habrá aumentado en 2,2 veces, lo que hará de la Tierra un lugar inhabitable al estar sometida a un intenso bombardeo de radiación en diferentes rangos, entre ellos el ultravioleta y el infrarrojo, convirtiendo a nuestro planeta en una roca desértica carente de toda vida. Los amaneceres, para entonces, serán tan espectaculares como aterradores. Sobre el horizonte se elevará un Sol cuyo disco será un 67% mayor que el actual, mientras las temperaturas ascienden rápidamente, hasta alcanzar cotas superiores a los 300 °C.

Dentro de unos 7100 millones de años, el equilibrio hidrostático se romperá y el Sol abandonará la secuencia principal e iniciará la transición hacia una gigante roja, aumentando su tamaño hasta engullir a Mercurio, y posiblemente también a Venus. En cuanto a la Tierra, su superficie se vaporizará literalmente hasta que sus estructuras internas queden expuestas al medio espacial.

El núcleo de helio del Sol se hará tan masivo y denso que, en tan solo cuestión de minutos, entrará en ignición. Cuando alcance una temperatura del orden de cien millones de grados Celsius, el helio comenzará a transformarse en carbono a partir de una reacción denominada triple alfa, en la que tres núcleos de helio se fusionarán para dar lugar a un átomo de carbono (último paso de la figura 2). Las reacciones nucleares se acelerarán con el transcurso del tiempo, y culminarán con varias explosiones, separadas entre sí varias decenas de miles de años, que expulsarán las capas exteriores del Sol al medio espacial, formando una bella nebulosa de colores y tonalidades diversas. Los gases emitidos se combinarán con el medio interestelar, y probablemente servirán de base para la formación de nuevas estrellas y sistemas planetarios. Un 55% de la masa del Sol quedará concentrada en un pequeño núcleo ultracondensado, conformando un nuevo tipo de estrella: una enana blanca.

Una evacuación ordenada y por fases

Muchos años antes de que el Sol inicie su transición a una gigante roja, la especie humana deberá haber abandonado el que es, hasta hoy, nuestro único hogar celeste, si bien los movimientos iniciales

no tendrán como destino otros sistemas planetarios. La expansión del ser humano en el espacio se realizará paulatinamente, comenzando en nuestro propio sistema solar, con migraciones a planetas y lunas potencialmente habitables, quizá no por su naturaleza, sino más bien por la capacidad que el ser humano haya adquirido para modificar las características atmosféricas de los cuerpos celestes, es decir, la capacidad de terraformación.

En este sentido, y como explicábamos en capítulos anteriores, Marte es el candidato perfecto para una primera migración, aunque esta sería parcial, dado que las dimensiones del planeta y sus recursos impedirían la transferencia de toda la población terrestre a nuestro vecino rojo. Existen otros cuerpos celestes de interés, y susceptibles de ser sometidos a procesos de terraformación. Tal es el caso de Titán, la segunda mayor luna del sistema solar, que se encuentra en órbita alrededor de Saturno. Está dotada de una atmósfera densa compuesta en su mayor parte de etano, metano e hidrógeno. Los científicos creen que sus condiciones son similares a las que albergaba la Tierra hace cuatro mil millones de años, antes de que aparecieran las primeras formas de vida.

En cualquier caso, la muerte de nuestra estrella, a la larga, hará inviable la vida en el sistema solar, y nuestra especie se verá obligada a elaborar un complejo y detallado protocolo que permita la migración definitiva a los exoplanetas.

Con una población humana en continuo y casi desmesurado crecimiento, incapaz de ver satisfechas sus necesidades por una paulatina falta de recursos, al ser estos limitados, parece razonable pensar que, para entonces, nuestras capacidades tecnológicas no permitirán la transferencia total de la población a un nuevo destino. De hecho, desconocemos si ese crecimiento demográfico conducirá a un colapso mundial antes de poder iniciar el viaje a otras estrellas. En cualquier caso, un exceso de población daría lugar a un polémico e injusto proceso: elegir a aquellos que sobrevivirán. Partiendo de la base de que todo ser humano tiene diferentes aptitudes y potenciales de enorme valor, y de que la psicología de cada individuo redundaría en un amplio abanico de reacciones, tanto positivas como negativas, ante determinadas circunstancias, ¿qué baremo debería emplearse en este caso? ¿Quién

debería asumir tal responsabilidad? No parece justo intentar establecer una selección a este respecto. De entrada, esta contraveniría un principio esencial que contempla la Carta Internacional de Derechos Humanos actualmente vigente: el derecho a la vida.

Quizá exista una solución efectiva al problema que evite la polémica e injusta tarea de realizar la selección: una reducción en la tasa de natalidad. Realizada con criterios objetivos, podría no solo hacer factible una transferencia total de la población llegado el momento, sino que también permitiría el mantenimiento y sostenibilidad de los recursos de la Tierra, fomentando con ello un acceso proporcionado y equitativo a los mismos por parte de todos los habitantes del planeta.

¿QUÉ TIPO DE CIVILIZACIÓN ES LA NUESTRA?

Esta es una pregunta difícil de responder, entre otras razones por la cantidad de facetas que nos definen como especie. En el año 1964, el astrónomo soviético Nikolái Kardashov estableció, de manera hipotética, una escala para definir los diferentes niveles de una civilización desde el criterio tecnológico, basándose en la capacidad de obtener energía a partir de fuentes espaciales. Kardashov propuso tres tipos de civilización:

- Tipo I. A él pertenecerían aquellas civilizaciones capaces de recopilar toda la potencia que un planeta recibe de su estrella matriz. En el caso de la Tierra, el total se aproximaría a una cifra de entre 10^{16} y 10^{17} W.
- Tipo II. Englobaría a las civilizaciones capaces de recopilar toda la potencia emitida por su estrella. Ello se conseguiría mediante métodos como la construcción de una estructura llamada esfera de Dyson, cuyo nombre se debe al físico y matemático Freeman Dyson, que literalmente envolvería a la estrella, impidiendo escapar cantidad alguna de energía (figura 3). En nuestro caso, la potencia total obtenida se situaría en torno a 10^{26} W.

FIG. 3

Escudo de Dyson, una variante de la esfera del mismo nombre. En esencia, es un escudo sólido que envuelve totalmente a la estrella, con un radio de aproximadamente 1 UA. Recogería una gran cantidad de energía infrarroja, parte de la cual escaparía al espacio.



— Tipo III. A esta categoría pertenecerían las civilizaciones capaces de obtener la potencia de su propia galaxia. En el caso de la Vía Láctea, el total de potencia obtenida concentrando la luz generada por todas sus estrellas sería de 10^{36} W. Observaciones galácticas realizadas en el rango del infrarrojo han determinado que la existencia de civilizaciones pertenecientes a este tipo es altamente improbable, al menos en el universo local.

Tomando como referencia la escala de Kardashov, nuestra civilización aún no ha llegado a alcanzar el tipo I. Sin embargo, algunos científicos como el físico teórico Michio Kaku creen que, dado el nivel de nuestro desarrollo tecnológico actual, la especie humana tardaría entre cien y doscientos años en llegar al tipo I, varios miles de años para alcanzar el tipo II y entre cien mil y un millón de años en convertirse en una civilización de tipo III. Para que la especie humana lograra abandonar el sistema solar y se adentrara en el océano cósmico con el fin de establecer su pre-

sencia en los exoplanetas, su nivel tecnológico debería situarse entre el tipo I y el tipo II de la escala, por lo que debemos recorrer aún un largo camino para lograrlo.

Al margen de la tecnología, nuestra civilización está aún muy lejos de ser civilizada, valga la redundancia. En el aspecto so-

cial, existen multitud de facetas de las que no podemos sentirnos, en absoluto, orgullosos, y que constituyen un verdadero óbice en la ambiciosa empresa de migrar a otras estrellas.

Una sociedad de pensamiento cortoplacista, llena de prejuicios, tendente al mínimo esfuerzo, a solucionar los problemas recurriendo a la violencia en lugar de al diálogo, y propensa a

marginar en función del género, el credo o la etnia, no hace más que sumergirse en una espiral de caos, injusticia, intolerancia e integrismo, y difícilmente logrará trabajar en equipo con propósitos comunes en empresas que requieren una alianza internacional multigeneracional.

Afortunadamente, el ser humano ha dado muestras de ser capaz de esforzarse y hacer cosas increíblemente positivas. Los avances científicos han permitido conseguir la curación de muchas enfermedades, y otras que aún no la tienen, como el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (sida), han dejado de ser una condena a muerte para las personas que las sufren, para convertirse en enfermedades crónicas. Por otra parte, los últimos treinta años han visto la caída de muros y de dictaduras, para acercarse más a una coexistencia pacífica entre naciones. Ciudadanos que antaño convivían con el ruido de los sables y de los morteros, hoy disfrutan de una paz duradera basada en la cooperación.

La ciencia nos ha permitido progresar como especie y se ha constituido como la única herramienta para conocer nuestro entorno y a nosotros mismos, aunque con frecuencia ha sido empleada de manera incorrecta. El ser humano debe experimentar un profundo cambio de mentalidad que le ayude a despojarse

Una civilización de tipo I [...] tendría el poder de manipular fenómenos planetarios, como huracanes, que pueden liberar tanta energía como cientos de bombas de hidrógeno.

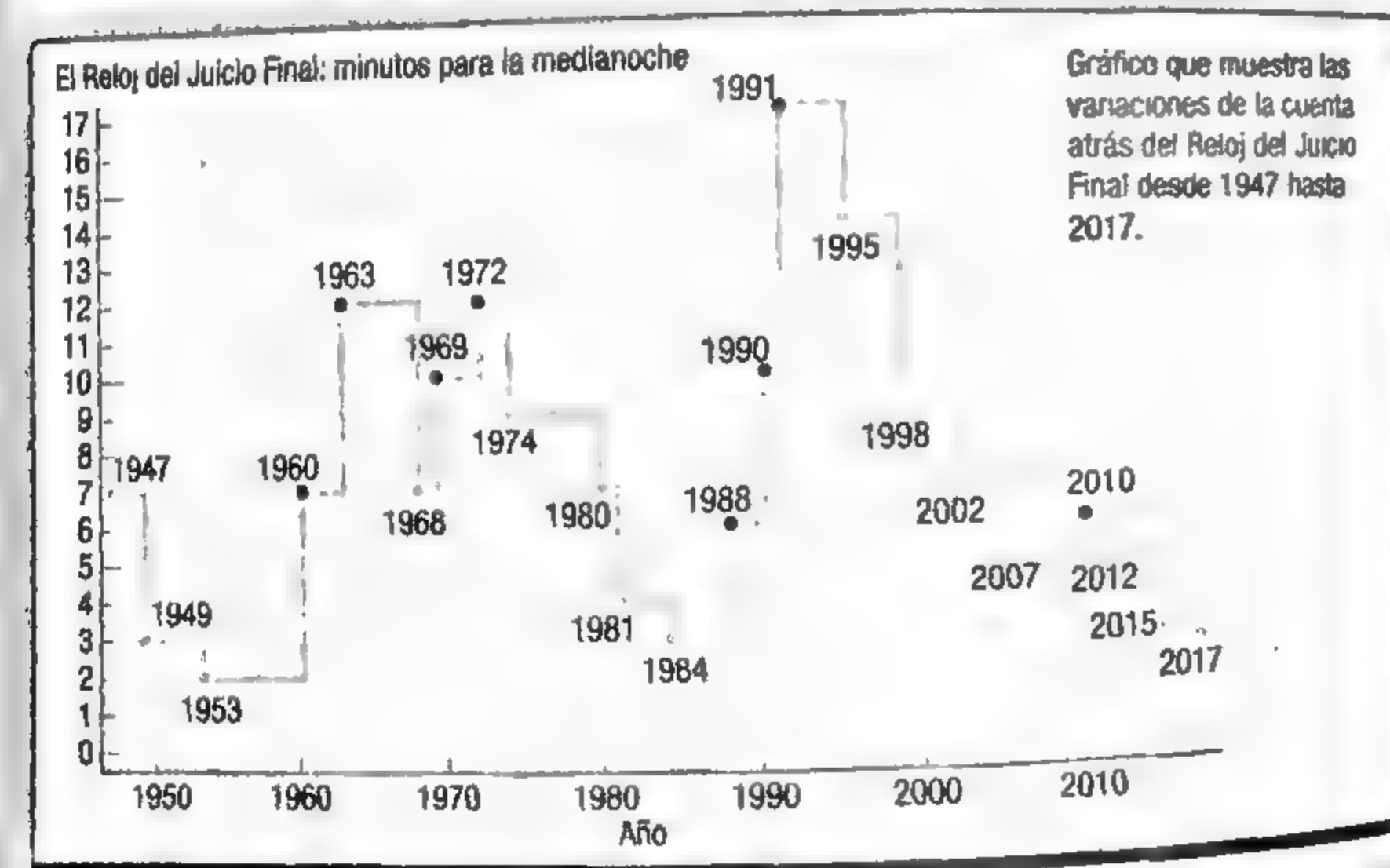
MICHIO KAKU

EL RELOJ DEL JUICIO FINAL

En el año 1947, el Panel de Ciencia y Seguridad del Boletín de Científicos Atómicos creó el llamado Reloj del Juicio Final, un símbolo que representa las probabilidades de que la Tierra sufra una catástrofe planetaria provocada por el ser humano. El reloj, que en principio solo medía el riesgo originado por conflictos atómicos, ha evolucionado con el tiempo, incluyendo ahora otras amenazas globales derivadas de la actividad humana, entre ellas el cambio climático.

A pocos minutos para la medianoche

El Reloj del Juicio Final se representa por una esfera similar a la de cualquier reloj analógico. Dos manillas, que indican la hora y los minutos, sitúan el nivel de riesgo de una catástrofe planetaria por la acción humana, siendo este proporcional a su proximidad a las 12 de la noche. En los últimos setenta años, el reloj se ha acercado mucho a la hora límite. Sin embargo, no responde de manera instantánea ante las diferentes amenazas. Los responsables se reúnen dos veces al año para discutir sobre los diferentes acontecimientos internacionales, y la hora del reloj se modifica en función de sus conclusiones. El resurgimiento de la amenaza nuclear, el terrorismo internacional y el negacionismo ante el cambio climático mostrado por el presidente estadounidense Donald Trump, hicieron de enero de 2017 el segundo momento de mayor aproximación a la medianoche, a tan solo dos minutos y medio de la hora final. El momento más crítico hasta la fecha se vivió en 1953, con motivo de la detonación, en noviembre del año anterior, de un arma termónuclear de Estados Unidos, seguida por otra de la Unión Soviética en agosto del año siguiente. Entonces, el reloj marcó las 23:58.



de esos factores tóxicos y a sacar lo mejor de sí mismo. Y todo se resume en una simple elección: optar por la supervivencia o por la autodestrucción. Si elegimos la supervivencia, nuestro viaje a las estrellas se habrá liberado del más importante de los obstáculos.

Preservación del conocimiento e identidad planetaria

En el hipotético caso de que el ser humano llegara a ser capaz de vencer a sus demonios internos y embarcarse rumbo a otras estrellas, antes debería afrontar un desafío igualmente trascendental: la preservación del conocimiento adquirido hasta entonces, la única vía para conservar nuestra identidad como especie. Existe un precedente, una fuente de información casi ilimitada, a la que llamamos popularmente internet. Millones de servidores, situados a lo largo y ancho de nuestro planeta e interconectados mediante cables de fibra óptica, garantizan el establecimiento de una red mundial de conocimiento. Empleada correctamente, constituye una colosal enciclopedia sobre nuestra civilización, que guarda ciertos paralelismos con la antigua Biblioteca de Alejandría, máximo exponente del conocimiento en el mundo antiguo, y que fue destruida en torno al siglo IV de nuestra era por el integrismo religioso. En el ciberespacio, portales web como archive.org y wikipedia.org son algunos de los ejemplos más populares de recopilación y conservación de la información.

Los vehículos que finalmente partan rumbo a otros sistemas solares deberán llevar consigo una serie de «arcas» que contengan no solo el conocimiento adquirido por el ser humano a través de los siglos —tanto fuentes originales como duplicados guardados en sistemas de soporte que sean capaces de garantizar el correcto almacenamiento durante centenares de años—, sino también ejemplares de aquellas formas de vida que, antes de la partida definitiva, pueblen la Tierra. Quizá, para entonces la genética habrá avanzado lo suficiente como para que, a partir de muestras celulares, puedan replicarse de manera sistemática tales organismos con una elevada tasa de éxito. Eso facili-

LA CÁMARA ACORAZADA DE SVALBARD

A unos 1300 kilómetros del Polo Sur, en la isla de Spitsbergen, perteneciente al archipiélago de Svalbard (Noruega), se sitúan unas instalaciones destinadas a la clasificación y conservación de las semillas producidas por las especies vegetales que actualmente pueblan nuestro planeta. Conocidas como Banco Mundial de Semillas de Svalbard, estas instalaciones albergan cerca de un millón de semillas pertenecientes a más de cuatro mil especies diferentes de plantas de cultivo que se emplean en la alimentación humana. La iniciativa, liderada por el conservacionista estadounidense Cary Fowler en asociación con el Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (CGIAR, por sus siglas en inglés), cuenta con el apoyo del Gobierno de Noruega, el Consorcio Agrícola y el Centro Nórdico de Recursos Genéticos (NordGen).

Un esfuerzo internacional

Aunque el Banco Mundial de Semillas de Svalbard inició sus operaciones el 28 de febrero de 2008, la iniciativa de conservar semillas comenzó mucho antes. A partir del año 1984, el Banco Nórdico de Genes (NGB) comenzó a trabajar en la conservación de miles de semillas mediante la técnica de congelación, en una mina de carbón abandonada en Svalbard. Por otra parte, en el continente africano, una iniciativa análoga desarrollada por la Comunidad de Desarrollo de África Austral recopiló otra importante cantidad de semillas. Ambos proyectos donaron todas las muestras recopiladas al Banco Mundial de Semillas de Svalbard, una vez que este estuvo operativo.

La importancia de conservar semillas

A lo largo de los años, muchas especies de plantas se han extinguido por diversos motivos, entre ellos los desastres naturales y la acción del ser humano. Con el propósito de evitar que nuevas extinciones vuelvan a darse en el futuro, las instalaciones de Svalbard tienen la misión de preservar la mayor cantidad posible de semillas y, de este modo, garantizar la pervivencia de las especies de plantas en nuestro planeta. Así, en caso de que la Tierra sufriera una catástrofe, ya fuera de carácter regional o global, las semillas conservadas en Svalbard servirían de base para la regeneración de aquellas especies afectadas.

Las semillas y la migración humana a otros sistemas solares

Este tipo de iniciativas tienen una trascendencia muy importante a largo plazo. No solo garantizan la pervivencia de las plantas en nuestro planeta ante eventuales catástrofes, sino que sirven de base para iniciativas orientadas a la conservación de formas de vida terrestres para su posterior transferencia a otros cuerpos celestes. Los vegetales serán esenciales en el proceso de terraformación de Marte, y jugarán un papel igualmente destacado en los esfuerzos encaminados a hacer de los planetas extrasolares lugares habitables. Las plantas, mediante la fotosíntesis, extraen dióxido de carbono de la atmósfera y producen oxígeno, que con el tiempo podría formar una capa de ozono que protegiera al planeta de la radiación.



Arriba, vista exterior del Banco Mundial de Semillas de Svalbard. Derecha, contenedores en los que son almacenadas las semillas en las instalaciones.



taría la instauración de flora y fauna en los planetas de destino y, con ella, las correspondientes redes tróficas que garantizaran la pervivencia de las especies. En los últimos años ya se están llevando a cabo proyectos que ponen en práctica el desarrollo de estas arcas. Uno de ellos, situado en la isla noruega de Spitsbergen, se dedica a la recopilación y conservación de semillas con el propósito de garantizar la pervivencia de las especies de plantas cultivadas ante una eventual crisis mundial que pudiera desembocar en su extinción.

LA PARTIDA DEFINITIVA

Vivimos en la primera mitad del siglo XXI, por lo que intentar vislumbrar de qué manera se llevará a cabo la partida definitiva de nuestra especie rumbo a otro sistema solar, acontecimiento que no tendrá lugar antes de mil años siendo optimistas en el cálculo, es harto complicado. No obstante, será un evento con una trascendencia sin parangón en la historia de la humanidad. Al abandonar nuestro hogar y mirar hacia atrás, será inevitable recordar aquella reflexión realizada por Carl Sagan en el año 1989, al contemplar la fotografía tomada por la sonda Voyager 1 más allá de la órbita de Neptuno, y en la que era visible nuestro planeta como un pequeño y pálido punto azul, suspendido en un rayo de luz del Sol:

Eso es aquí. Ese es nuestro hogar. Somos nosotros. Todas aquellas personas a las que quieres, a las que conoces, de las que has oído hablar alguna vez, todos los seres humanos que han existido, han vivido sus vidas aquí. La suma de nuestra felicidad y sufrimiento, miles de confiadas religiones, ideologías y doctrinas económicas; cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de la civilización, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y cada padre, cada niño esperanzado, cada inventor y explorador, cada profesor de valores, cada político corrupto, cada «superestrella», cada «líder supremo», cada

santo y cada pecador de la historia de nuestra especie, ha vivido ahí, en un una mota de polvo suspendida en un rayo de luz del Sol.

La Tierra es un escenario muy pequeño en un enorme ruedo cósmico. Piensen en los ríos de sangre derramada por todos esos generales y emperadores para que, con su gloria y su triunfo, pudieran llegar a convertirse en dueños momentáneos de una fracción de un punto. Piensen en las infinitas crueldades cometidas por los habitantes de una esquina de ese píxel sobre los apenas distinguibles habitantes de cualquier otro rincón. Cuán frecuentes sus malentendidos, cuántas ganas de matarse los unos a los otros, cuán ferviente su odio. Nuestras posturas, nuestra imaginada autoimportancia, la ilusión de que tenemos una posición privilegiada en el universo, todo eso se ve cuestionado por ese punto de luz pálida. [...] Se ha dicho que la astronomía es una experiencia humilde que forja el carácter. Quizá no haya mejor demostración de lo absurdo de la arrogancia humana que esta imagen tan lejana de nuestro minúsculo mundo. Para mí, subraya la responsabilidad que tenemos de tratarnos los unos a los otros de forma más amable y compasiva, y de preservar y cuidar mejor ese pálido punto azul, el único hogar que hemos conocido.

LECTURAS RECOMENDADAS

////////////////////////////////////

- ASIMOV, I., *Yo, robot*, Barcelona, Edhasa, 2004.
- BOOTH, N., *El espacio en los próximos 100 años*, Barcelona, Planeta, 1991.
- CLARKE, A.C., *Cánticos de la lejana Tierra*, Madrid, Alamut Ediciones, 2011.
- CLAROS, V. y LEÓN, R. *Historia de la estación de seguimiento de satélites de Villafranca del Castillo «VILSPA» (1975-2009)*, Madrid, INTA/INSA, 2011.
- HERRERA, E., *Ciencia aeronáutica*, Madrid, Fundación Aena, 2009.
- JAKOSKY, B., *La búsqueda de vida en otros planetas*, Madrid, Cambridge University Press, 2003.
- JASTROW, R., *La exploración del espacio*, Barcelona, RBA, 1993.
- RUIZ DE GOPEGUI, L., *Rumbo al cosmos*, Madrid, Temas de Hoy, 1998.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- : *La conexión cósmica*, Barcelona, Ediciones Orbis, 1985.
- : *Un punto azul pálido: una visión del futuro humano en el espacio*, Barcelona, Planeta, 2006.
- VV.AA., *Gran atlas del espacio*, Barcelona, Ebrisa, 1988.
- WATSON, F., *Astronómica*, Barcelona, H.F. Ullmann Publishing, 2012.

INDICE

////////////////////////////////////

- 100 Year Starship 78, 79
5'-adenosina monofostato 114
51 Pegasi 29, 30, 32, 33
ADN 57, 126, 127
Alfa Centauri 9, 24, 25, 53
Alfa Centauri B 85
Allen, Irwin 24
Anglada-Escudé, Guillem 41, 84
animación suspendida 18, 20, 21,
103, 104, 113, 114
arco de choque 56, 53
Arrhenius, Svante 124
Asimov, Isaac 118-120
asistencia gravitatoria 58, 60
asteroides, cinturón de 50
Atlantis (transbordador) 130
- Banco Mundial de Semillas de
Svalbard 148, 149
Barnard (estrella) 68, 69
BIS (Sociedad Británica
Interplanetaria) 68, 70
- biomimética 116, 120
Bond, Alan 68
Breakthrough Starshot 72
- Carnobacterium pleistocenium*
128
Ceres 50
Chi Lee, Cheng 114
Chicxulub, evento de 137
choque de terminación 51
Clarke, Arthur C. 21
Coruscant (planeta ficticio)
89
Cosmos 129
Bussard, Richard W. 20, 74, 75
Butler, Paul 30
- Daedalus, Proyecto 68-70
DEEP-IN (programa espacial)
42, 71, 72
dilatación del tiempo 76-78
Dimidium 30

Drake, Frank 129, 133
 fórmula de 133
 Dsup (proteína) 127
 Dyson, Freeman 66, 143
 ecopoyesis 108, 110, 111
 efecto invernadero 39, 90, 109, 111, 138
 Einstein, Albert 76
 enana blanca 141
 enana ultrafría 44, 94
 energía enfocada 70, 71, 73
 Épsilon Eridani (sistema planetario) 83
 ESA (Agencia Espacial Europea) 34, 86, 97
 ESAC (Centro Europeo de Astronomía Espacial) 97
 ESO (Observatorio Europeo Austral) 41, 42, 57, 84, 88, 91, 92, 94
 estatorreactor 20, 74-76
 exoplaneta (planeta extrasolar) 26, 30, 32, 39-41, 43, 44, 49, 84, 85, 88, 95, 96
Exploradores 25
 extremófilos 123, 124, 126, 127
 Fomalhaut b 34, 36
 Frail, Dale 29
 Friedman, Louis 70, 71
 Galileo (sonda espacial) 130, 131
 generacional, nave 16, 17, 18, 20
 generador térmico de radioisótopos 54, 60, 72, 74
 Gliese 667Cc 45, 88, 89
 Goddard, Robert 16, 17, 18, 20
 GRB (explosión de rayos gamma) 138
 Hawking, Stephen 72

Haynes, Robert 108
 heliocapa 51-53
 heliopausa 52, 53, 56
 heliosfera 10, 51-56, 60, 62
 hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH) 57
 Hoover, Richard 126
 Hubble (telescopio espacial) 34, 37, 43, 44, 86, 87
 Icarus, Proyecto 70
 inteligencia artificial 78, 116, 119
 ISS (Estación Espacial Internacional) 67, 76, 77, 127
 Jemison, Mae 78
 JWST (Telescopio Espacial James Webb) 44, 86, 87, 98
 Kardashov, Nikolái 143
 escala de 143, 144
 KBO (Objetos del cinturón de Kuiper) 51
 Kelly, Scott 77
 Kepler, telescopio 36, 37, 89, 96
 Kepler-186f 36, 45, 96, 98
 Kepler-452b 45, 89-91
 Kornienko, Mijaíl 77
 Kuiper, cinturón de 50, 51, 56, 93
 La Silla, Observatorio de 33, 41, 42, 91, 95
 Lagrange, punto 86, 87, 97
 LightSail (vela solar) 71
Perdidos en el Espacio 24
 Marcy, Geoffrey 30
 Mayor, Michel 29, 30, 32, 33
 medio interestelar 10, 50-58, 60-62, 75, 141
 Milner, Yuri 72

Morgan-Keenan (sistema de clasificación estelar) 35
 muro de hidrógeno 56
 Murray, Bruce 70, 71
 Nanosail-D (vela solar) 71
 NASA 9, 26, 34, 36, 42, 52, 57, 58, 66, 71, 72, 77, 78, 86, 87, 89, 93, 94, 96, 104, 116, 117, 126, 129, 130
 New Horizons (sonda espacial) 51, 58, 60
 Nostromo (nave espacial ficticia) 15, 23
 O'Bannon, Dan 23
 Oberth, Hermann 59
 maniobra y efecto 58, 59
 Obousy, Richard 70
 Ogier el danés 20
 ONU (Organización de las Naciones Unidas) 132
 Oort, nube de 53, 54, 56
 Orión, brazo de 65, 67, 106
 Proyecto 66-68
 panspermia, teoría de la 124
 permafrost 126
 Pioneer (programa espacial) 51, 58, 60, 129
Pitch Black 25
 Planetary Society, The (Sociedad Planetaria) 71, 72
 PLATO (nave espacial) 97
 procesador atmosférico 22
 protocolo posdetección 132
 Próxima b 9, 41, 42, 45, 49, 84, 85, 88, 89, 95
 psicrofilos 124, 126
 PSR 1257+12 29

Queloz, Didier 29, 30, 32, 33

Reloj del Juicio Final 146
 robot 8, 10, 21, 22, 24, 42, 50, 51, 58, 60, 71, 78, 85, 101, 102, 105, 109, 115-117, 119, 120, 129
 robótica, leyes de la 119, 120
 Sagan, Carl 70, 71, 123, 129, 150
 secuencia principal 29, 32, 34, 35, 83, 141
 SETI (Búsqueda de Vida Inteligente Extraterrestre, programa) 129, 132
 Shusett, Ronald 23
 supertierra 36, 89, 91, 97
 tardigrado 127
 Taylor, Ted 66
 termófilos 124-126
 terraformación 84, 105, 109-111, 148
 TRAPPIST-1 42-45, 92, 94, 96
 Tsiolkovski, Konstantín 11, 18, 104
 vela eléctrica 72, 74
 vela solar 70, 71, 73, 74
 ventana de lanzamiento 103
 VLT (Telescopio de Gran Extensión) 42, 94
 Voyager
 programa espacial 129
 naves 9, 51-54, 56, 58, 60, 61, 72, 106, 150
 wafer sat (satélite barquillo) 71
 Wolf 1061c 45, 90-92, 95
 Wolszczan, Alexander 29
 zona habitable 38, 84, 94, 97